

Безопасность техногенных и природных систем

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2017 года)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Том 7, № 3, 2023

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ).
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.
E-mail	vestnik@donstu.ru
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	https://bps-journal.ru
Дата выхода в свет	30.08.2023





Safety of Technogenic and Natural Systems

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2017)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Vol. 7, no. 3, 2023

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

The journal publishes articles in the following fields of science:

Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
Materials Science (Engineering Sciences)
Fire Safety (Engineering Sciences)
Environmental Safety (Engineering Sciences)
Occupational Safety (Engineering Sciences)

Indexing and archiving:	RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Name of the body that registered the publication	Mass media registration certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 dated Jule, 21, 2016, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
Founder and publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU).
Periodicity	Quarterly (4 issues per year)
Address of the founder and publisher	Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	vestnik@donstu.ru
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	https://bps-journal.ru
Date of publication	30.05.2023



Editorial Board

Содержание

Contents

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY




УДК 614.84 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-7-13

Теплоустойчивость теллурида кадмия в инфракрасных детекторах для мониторинга пожарной обстановки

А.В. Мозжерин✉, **Н.Н. Паклин**
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация
✉ Amozzherin@sfu-kras.ru

Аннотация
Введение. Тепловое воздействие пожара на технические средства — распространенная и серьезная проблема. В этой связи представляется актуальной задачей исследование физико-химических и тепловых превращений в устройствах на основе теллурида кадмия при техногенных или природных пожарах. По ряду материалов подобные исследования не проводились, а имеющиеся результаты недостаточны или узкопрофильны. В предложенной статье представлены новые данные по дефектостойкости и применимости материала в зависимости от теплового воздействия. Цель исследования — изучение особенностей деградации под воздействием экстремальных температур для создания новых материалов с заданными свойствами.
Материалы и методы. Исследовались образцы теллурида кадмия (CdTe), используемые в солнечных панелях и детекторах. В практической части работы оценивалось тепловое воздействие на образец обычных и экстремальных температур с последующим изучением материала методами просвечивающей электронной микроскопии. Эксперименты имитировали зону теплового воздействия пожара. Расчетно-теоретическая работа заключалась в совершенствовании математической модели физико-химических превращений и эволюции дефектов при тепловом воздействии до 1092 °C. Математическая модель учитывала теплодозу, характерную для неуправляемого горения. Для решения уравнений задействовали программный пакет Maple.
Результаты исследования. Визуализировано формирование дефектов в образце CdTe при существенно разных уровнях теплового воздействия. Нижняя граница — около 20 °C, верхняя — более 600 °C. Детально проработаны превращения в контрольных образцах CdTe при воздействии температуры до 1092 °C с шагом 15 °C. Точечные дефекты, обусловленные воздействием температуры, представлены как фактор разрушения материала, а следовательно, и сбоев в работе устройства. Решена система уравнений, которая учитывает комплекс параметров: частоту колебаний атомов в решетке, температуру, концентрации узлов CdTe, междоузельных атомов и вакансий, миграцию и присоединение междоузельных атомов и вакансий. Графически представлены концентрации вакансий и междоузельных атомов в образцах CdTe в зависимости от толщины и температуры. Итоги научных изысканий позволяют утверждать, что детекторы на основе CdTe относительно корректно работают только при теплодозе до 400 °C. В диапазонах 400–600 °C дефектная сеть материала активно эволюционирует, препятствуя разрушению. Однако дальнейшее увеличение теплового воздействия приводит к полной деградации оборудования, что не позволяет использовать теллурид кадмия в экстремальных условиях даже непродолжительное время.
Обсуждение и заключение. Предложенная усовершенствованная модель физико-химических превращений в устройствах на основе CdTe в зонах теплового воздействия позволит более избирательно подходить к вопросу использования оборудования. Кроме того, необходимо совершенствовать материалы и повышать их стойкость к экстремальным температурам.

Ключевые слова: теллурид кадмия, формирование дефектов в образце CdTe, концентрация узлов, концентрация вакансий, междоузельные атомы CdTe

Благодарности: авторы выражают признательность коллегам из лаборатории нанодисперсных и композиционных материалов ФГБНУ «ФИЦ КНЦ СО РАН». Кроме того, благодарим редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

Для цитирования. Мозжерин А.В., Паклин Н.Н. Теплоустойчивость теллурида кадмия в инфракрасных детекторах для мониторинга пожарной обстановки. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):7–13. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-8-3-7-13

Original article

Thermal Stability of Cadmium Telluride in Infrared Detectors for Monitoring Fire Conditions

Aleksandr V. Mozzherin ✉, **Nikolay N. Paklin**
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation
✉ Amozzherin@sfu-kras.ru

Abstract
Introduction. Thermal effect of fire on technical means is a common and serious problem. In this regard, it seems an urgent task to study physicochemical and thermal transformations in devices based on cadmium telluride during man-made or natural fires. For a number of materials, such studies have not been conducted, and the available results are insufficient or narrowly focused. The proposed article presents new data on the defect resistance and applicability of the material depending on the thermal effect. The work objective is to study the features of degradation under the influence of extreme temperatures to create new materials with specified properties.
Materials and Methods. Cadmium telluride (CdTe) samples used in solar panels and detectors were studied. In the practical part of the work, the thermal effect on the sample of normal and extreme temperatures was evaluated, followed by the study of the material by transmission electron microscopy methods. The experiments simulated a zone of thermal impact of a fire. The computational and theoretical work consisted in improving the mathematical model of physical and chemical transformations and the evolution of defects under thermal influence up to 1092 °C. The mathematical model took into account the heat dose characteristic of uncontrolled combustion. The Maple software package was used to solve the equations.
Results. The formation of defects in a CdTe sample at significantly different levels of thermal exposure was visualized. The lower limit was about 20 °C, the upper one was more than 600 °C. Transformations in CdTe control samples under the influence of temperatures up to 1092 °C with a step of 15 °C were worked out in detail. Point defects caused by the influence of temperature were presented as a factor of destruction of the material, and consequently, failures in the operation of the device. A system of equations was solved that takes into account a set of parameters: the frequency of vibrations of atoms in the lattice, temperature, concentrations of CdTe nodes, interstitial atoms and vacancies, migration and attachment of interstitial atoms and vacancies. The concentrations of vacancies and interstitial atoms in CdTe samples depending on thickness and temperature were graphically presented. The results of scientific research allowed us to assert that CdTe-based detectors worked relatively correctly only at a heat dose of up to 400 °C. In the ranges of 400-600 °C, the defective network of the material actively evolved, preventing destruction. However, a further increase in thermal exposure led to complete degradation of the equipment, which did not allow the use of cadmium telluride in extreme conditions, even for a short time.
Discussion and Conclusion. The proposed improved model of physical and chemical transformations in CdTe-based devices in heat-affected areas will allow a more selective approach to the use of equipment. In addition, it is necessary to improve materials and increase their resistance to extreme temperatures.

Keywords: cadmium telluride, formation of defects in a CdTe sample, density of nodes, vacancy concentration, CdTe interstitial atoms

Acknowledgements: the authors express their gratitude to colleagues from the Laboratory of Nanodisperse and Composite Materials of the Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences". In addition, the authors would like to thank the Editorial Team of the Journal and the Reviewer for attentive attitude to the article and suggestions made that helped to improve its quality.

For citation. Mozzherin AV, Paklin NN. Thermal Stability of Cadmium Telluride in Infrared Detectors for Monitoring Fire Conditions. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3):7–13. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-7-13

Введение. Теллурид кадмия (CdTe) — бинарное химическое соединение кадмия (Cd) и теллура (Te), прямозонный полупроводник группы A_2B_6. Благодаря высокой температуре плавления и нерастворимости, это одно из самых стабильных соединений Cd. CdTe — стратегически важный материал для создания тонкопленочных солнечных элементов, универсальных инфракрасных детекторов и других приборов.

Важный вопрос с точки зрения производственной практики — работа приборов и устройств в различных условиях внешней среды, их долговечность и пожаровзрывобезопасность[1]. Хорошо известно, что любое полупроводниковое соединение имеет тенденцию к деградации и изменению физико-химических свойств. Это обусловлено процессами дефектообразования, которые происходят в том числе из-за теплового воздействия [1]. Чрезвычайно важным представляется понимание этих процессов для применения материалов в экстремальных условиях с сохранением заданных свойств, с минимальным риском возникновения пожаров, аварий и других чрезвычайных ситуаций.

Следует отметить, что пока научные изыскания в этой сфере не дали исчерпывающих результатов. По ряду материалов исследования не проводились, а имеющиеся данные недостаточны или узкопрофильны. Авторы представленной статьи предлагают новые сведения, касающиеся устойчивости к дефектам и применимости материала, испытывающего тепловое воздействие. Цель исследования — изучить особенности деградации в условиях экстремальных температур для создания новых материалов с заданными свойствами.

Материалы и методы. Итак, изучалась работа устройства в случае возникновения экстремальных событий — природного или техногенного пожара. Объектами исследования были три контрольных образца теллурида кадмия. Их сняли с солнечной батареи и подвергли постоянному тепловому воздействию от 20 °C до 1092 °C. Общие данные исследуемых материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1

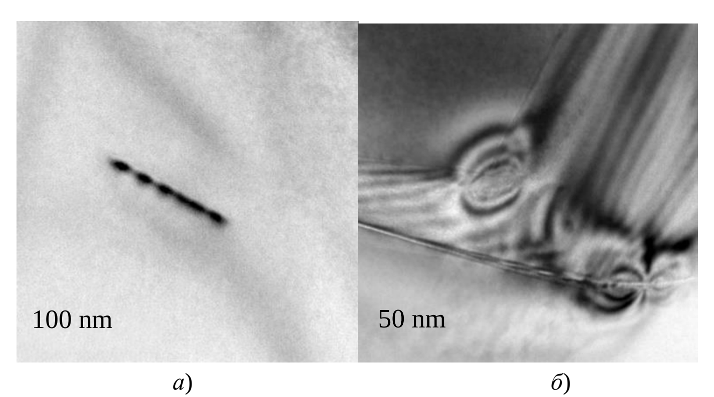
Отдельные свойства и характеристики теллурида кадмия [2–4]

Химическая формула	CdTe
Плотность, г/см^3	5,8585
Температура плавления, °C	1092
Растворимость в воде и других растворителях	Нерастворимый
Кристаллическая структура	Кубическая, сфалерит (цинковая обманка)
Параметр решетки, нм	0,648
Коэффициент Пуассона, υ	0,41
Модуль сдвига, ГПа	9,2
Энергия дефекта упаковки, мДж/м^2	11±1,9
Пожаровзрывобезопасность	Негорючий
Токсичность	Токсичен, особо опасен в водной среде

Базовое экспериментальное исследование проводилось методом просвечивающей электронной микроскопии на приборе JEOL JEM-2100 с предварительной пробоподготовкой образцов согласно базовым методикам [5]. Теоретическая работа строилась на создании математической модели физико-химических превращений в устройствах на основе теллурида кадмия с учетом теплодозы, возникающей при развитии процесса неуправляемого горения. Системы уравнений решались в программном пакете Maple.

Результаты исследования. Экспериментальная часть работы описана в [2, 4]. Полученные данные показали, что воздействие теплового излучения приводит к формированию и активной эволюции дефектной сети (рис. 1), представленной преимущественно ростовыми дислокациями. В отдельных случаях, при наличии в атмосфере кадмия или других веществ появляются преципитаты с трансформацией дислокаций в дислокационные петли или дефекты упаковки [3, 6–7].

[1] ГОСТ 2.1.004-91. *Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/9051953 (дата обращения: 17.04.2023).



а) *б*)

Рис. 1. Формирование дефектов в образце CdTe при тепловом воздействии:
а — ~ 20 °С; *б* — более 600 °С. Масштаб в нанометрах

Теоретическая часть исследования включала детальную проработку превращений в контрольных образцах CdTe при воздействии температуры до 1092 °С с шагом 15 °С. При таком характере работы устройств, особенно вблизи температуры плавления, происходит деструкция материала, что прямо связано с образованием и развитием точечных дефектов.

С учетом фиксации температурного режима и предшествующих экспериментальных данных моделировалось образование междоузельных атомов и вакансий, а также их скоплений в виде дислокационных петель и пор в CdTe. Эффективные значения энергии тепловой диссоциации решетки (E_p) и коэффициента теплового рождения пар точечных дефектов (P) позволяют усовершенствовать систему уравнений равновесного распределения дефектов, приведенную в [8–9] к следующему виду:

$$\begin{aligned} Pc_0 + D_I \cdot C_I'' - R \cdot C_I \cdot C_V - 2A_I \cdot C_I^2 = 0, \\ Pc_0 + D_V \cdot C_V'' - R \cdot C_I \cdot C_V - 2A_V \cdot C_V^2 = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $P = \nu \cdot \exp(-E_p/kT)$, ν — частота колебания атомов в решетке, k — постоянная Больцмана, T — температура, c_0 — концентрация узлов CdTe, C_I и C_V — эффективные концентрации междоузельных атомов и вакансий, D_I и D_V — коэффициент диффузии (миграции) междоузельных атомов и вакансий, A_I и A_V — коэффициент агломерации (присоединения) междоузельных атомов и вакансий соответственно, R — коэффициент рекомбинации.

Для расчетов используются численные значения указанных величин (таблица 2).

Таблица 2

Численные значения параметров кристалла теллурида кадмия [3, 8–9]

c_0	D_I	D_V	A_I	A_V	R	ν	E_p	P
$см^{-3}$	$см^2с^{-1}$	$см^2с^{-1}$	$см^3с^{-1}$	$см^3с^{-1}$	$см^3с^{-1}$	$с^{-1}$	эВ	$см^3с^{-1}$
$1{,}5 \cdot 10^{22}$	$4{,}2 \cdot 10^7$	$8{,}3 \cdot 10^2$	$7{,}5 \cdot 10^4$	$1{,}1 \cdot 10^4$	$1{,}7 \cdot 10^8$	10^{13}	1,4	$2{,}6 \cdot 10^{-11}$

Решение системы уравнений (1) представлено на рис. 2, 3. Как отмечалось выше, верхняя кривая соответствует 1092 °С, шаг — 15 °С.

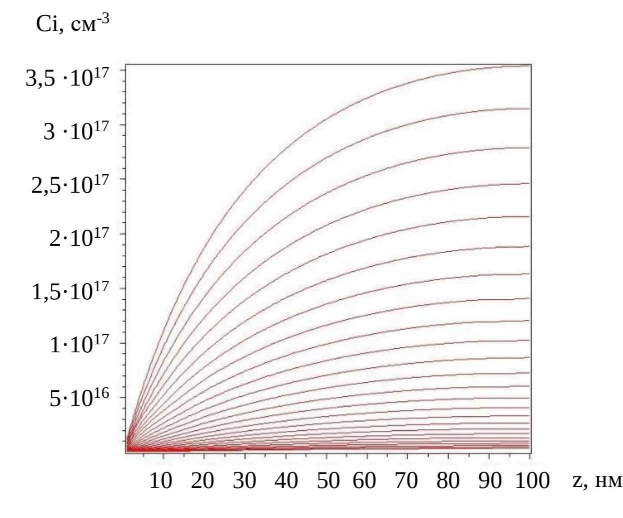


Рис. 2. Концентрации вакансий в образцах CdTe в зависимости от толщины (z) при различных температурах

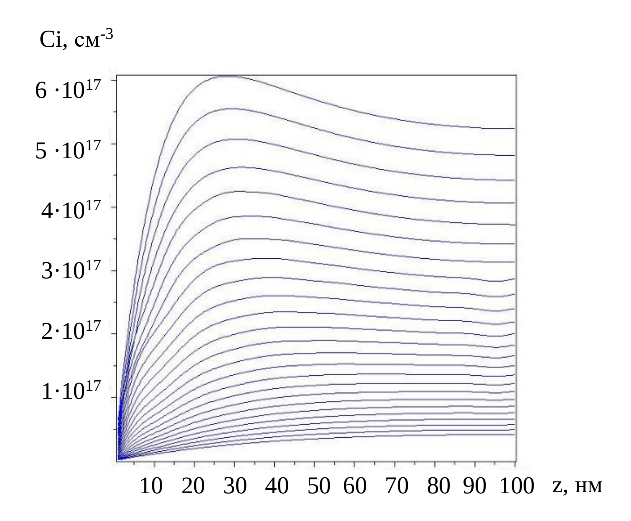


Рис. 3. Концентрации междоузельных атомов в образцах CdTe в зависимости от толщины (z) при различных температурах

Полученные данные позволяют утверждать, что до температуры 400 °C точечные дефекты (вакансии и междоузлия) влияют на физико-химические свойства слабо, с линейным увеличением. При повышении указанной границы фиксируются нелинейные изменения. Это можно объяснить обратным влиянием дефектов (противодействие разрушению полупроводника). Особенно заметна активная деградация при температурах выше 600 °C. Под воздействием температуры 1000 °C теллурид кадмия начинает разрушаться.

Обсуждение и заключение. Представленное исследование подтвердило активные физико-химические превращения в образцах теллурида кадмия при равновесном тепловом воздействии до 1092 °C. Результаты решения модифицированной системы уравнений (1) позволяют утверждать, что с повышением температуры увеличивается деструкция в образцах теллурида кадмия, растет дефектная сеть. Эти процессы становятся причиной выхода из строя оборудования с данным материалом.

Приборы и устройства на основе теллурида кадмия показывают высокую тепловую устойчивость и надежную работу до 100 °C. Однако их использование ограничивается и становится крайне малоэффективным при высоких температурах. В экстремальных условиях более подходящими оказываются такие полупроводниковые материалы, как кремний и германий.

Список литературы

1. Glas F. A simple calculation of energy changes upon stacking fault formation or local crystalline phase transition in semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 2008;104(9):093520. https://doi.org/10.1063/1.3009338

2. Мозжерин А.В., Паклин Н.Н. Дефектообразование в теллуриде кадмия. В: *Тр. XXV Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева*. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева; 2021. С. 581–582.

3. Логинов Ю.Ю, Браун П.Д., Дьюроуз К. *Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках* A_2B_6. Москва: Логос; 2003. 304 с.

4. Логинов Ю.Ю., Мозжерин А.В., Брильков А.В. Электронно-микроскопические исследования дефектообразования в легированных примесями монокристаллах CdTe, ZnS, ZnSe. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева.* 2013;3(49):209–211. https://vestnik.sibsau.ru/en_US/vestnik/902/ (дата обращения: 25.07.2023).

5. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. Москва: Техносфера; 2006. 256 с. URL: https://www.technosphera.ru/lib/book/83 (дата обращения: 25.07.2023).

6. Loginov Y.Y., Mozzherin A.V., Paklin N.N. Particularities of the interstitial atoms and vacancies clusters formation in a thin cadmium telluride foil during in situ electron irradiation in a TEM. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022;1230:012013. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1230/1/012013

7. Горичок И.В. Энтальпия образования дефектов Шоттки в полупроводниках. *Физика твердого тела*. 2012;54(7);1373–1376. URL: http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/665 (дата обращения: 25.07.2023).

8. Loginov Yu.Yu., Mozzherin A.V., Paklin N.N. Modeling structural defect formation in cadmium telluride during electron irradiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;467:012007. https://doi.org/10.1088/1757-899X/467/1/012007

9. Паклин Н.Н., Логинов Ю.Ю., Мозжерин А.В. Равновесное распределение дефектов в теллуриде кадмия до воздействия внешних факторов. *Сибирский аэрокосмический журнал.* 2022;23(2):315–320. https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-2-315-320

References

1. Glas F. A simple calculation of energy changes upon stacking fault formation or local crystalline phase transition in semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 2008;104(9):093520. https://doi.org/10.1063/1.3009338

2. Mozzherin AV, Paklin NN. Defektoobrazovanie v telluride kadmiya. In: *Tr. XXV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoi pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva.* Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 2021. P. 581–582.

3. Loginov YuYu, Braun PD, Dyurouz K. *Zakonomernosti obrazovaniya strukturnykh defektov v poluprovodnikakh* A_2B_6. Moscow: Logos; 2003. 304 p.

4. Loginov YuYu, Mozsherin AV, Brilikov AV. The electron microscopic study of the defect formation in the doped single crystals CdTe, ZnS and ZnSe. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva.* 2013;3(49):209–211. https://vestnik.sibsau.ru/en_US/vestnik/902/ (accessed: 25.07.2023).

5. Sindo D, Oikava T. *Analiticheskaya prosvechivayushchaya elektronnaya mikroskopiya*. Moscow: Tekhnosfera; 2006. 256 p. URL: https://www.technosphera.ru/lib/book/83 (accessed: 25.07.2023).

6. Loginov YY, Mozzherin AV, Paklin NN. Particularities of the interstitial atoms and vacancies clusters formation in a thin cadmium telluride foil during in situ electron irradiation in a TEM. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022;1230:012013. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1230/1/012013

7. Gorichok IV. Enthalpy of formation of schottky defects in semiconductors. *Physics of the Solid State*. 2012;54(7);1373–1376. URL: http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/665 (accessed: 25.07.2023).

8. Loginov YuYu, Mozzherin AV, Paklin NN. Modeling structural defect formation in cadmium telluride during electron irradiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;467:012007. https://doi.org/10.1088/1757-899X/467/1/012007

9. Paklin NN, Loginov YuYu, Mozzherin AV. Equilibrium distribution of defects in cadmium telluride before exposure to external factors. *The Siberian Aerospace Journal.* 2022;23(2):315–320. https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-2-315-320

Поступила в редакцию 28.07.2023
Поступила после рецензирования 08.08.2023
Принята к публикации 11.08.2023

Об авторах:

Александр Владимирович Мозжерин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ЮНЕСКО новых материалов и технологий Сибирского федерального университета (660041, РФ, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79), AuthorID, ORCID, Amozzherin@sfu-kras.ru

Николай Николаевич Паклин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и волновых явлений Сибирского федерального университета (660041, РФ, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79), ORCID, AuthorID, Npaklin@sfu-kras.ru

Заявленный вклад соавторов:

Авторы внесли равноценный вклад в постановку задач и цели исследования, проведение экспериментов, расчеты, формулирование выводов и корректировку текста статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 28.07.2023
Revised 08.08.2023
Accepted 11.08.2023

About the Authors:

Aleksandr V. Mozzherin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the UNESCO New Materials and Technologies Department, Siberian Federal University (79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk, 660041, RF), AuthorID, ORCID, Amozzherin@sfu-kras.ru

Nikolay N. Paklin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Theoretical Physics and Wave Phenomena Department, Siberian Federal University (79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk, 660041, RF), ORCID, AuthorID, Npaklin@sfu-kras.ru

Claimed contributorship:

The authors have made an equal contribution to the formulation of research objectives and goals, conducting experiments, calculations, drawing conclusions and correcting the text of the article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY




УДК 620.193-047.42(075.8) Научная статья
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-14-23

Свойства салицилиден-анилина как ингибитора коррозии в системах транспортировки нефти и нефтепродуктов

С.Г. Курень ✉[1], **С.А. Воляник**[2], **М.А. Савенкова**[2], **Э.А. Зайцева**[3]
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[3] Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉sergejgrigorevich@yandex.ru

Аннотация
Введение. Значимая проблема техносферной безопасности — риски аварий и пожаров при транспортировке и перекачке нефти и нефтепродуктов. Причинами могут быть утечки из-за коррозионных повреждений трубопроводов, цистерн, резервуаров нефтехранилищ. Ввиду возможных серьезных финансовых, экологических и социальных последствий таких происшествий важно постоянно изыскивать новые, более эффективные, подходы к предотвращению коррозионных процессов. Очевидно, например, что в настоящее время досконально изучены далеко не все химические соединения, способные подавлять или тормозить разрушение металлов и сплавов. Представленная научная работа призвана отчасти преодолеть недостаток данных в этой области. Цель — исследовать малоизученное соединение салицилиден-анилин, которое может быть ингибитором коррозии аналогично другим, сходным по строению и составу азотсодержащим составам.
Материалы и методы. Для исследования ингибиторных, адсорбционных и комплексообразующих свойств салицилиден-анилина использовали гравиметрический метод. Проводили опыты с пластинами из стали Ст3. Фиксировалась масса металлических образцов без ингибитора и с ингибитором до и после выдержки в испытуемых средах. Эффект определяли по изменению скорости коррозии. При постановке экспериментов ориентировались на ГОСТ 9.905–82 «Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний». Объем коррозионной среды определили по ГОСТу 9.506–87 «Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов в водно-нефтяных средах». Критерии коррозии взяли из ГОСТа 9.908–85 «Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости». Расчеты основывались на принципе оценивания, который задает отношение мультипликативного метризованного линейного порядка на множестве частных критериев. Для ранжирования использовали интегральный показатель, основанный на математическом и методическом подходах.
Результаты исследования. Изучено воздействие солянокислой среды на образцы стали Ст3. Брали четыре концентрации ингибитора: 0 %, 0,01 %, 0,1 %, 0,2 %. Зафиксировали массу металлических образцов без ингибитора и с ингибитором до и после выдержки в испытуемых средах. Эффект определили по изменению скорости коррозии. Рассчитали массовый показатель коррозии. Качество поверхности при разрушении и ингибировании коррозии определяли в пять этапов: выбрали оцениваемые элементы, сформулировали цель оценивания, нашли элементы технического состояния исследуемого объекта, описали суть определения полезности или ценности критерия, пояснили суть оптимизации. Исследуемые свойства ранжировали по отношению мультипликативного метризованного линейного порядка на множестве частных критериев. Для расчетов поставили задачу — определить компоненты вектора B в соответствии с одним из этапов оценки. Речь идет о стадии, когда полезность или ценность критерия анализируется по точкам на числовой оси, указывающим на состояние объекта «лучше — хуже». Построили показатель z, аппроксимирующий известную или задаваемую (обучающую) матрицу парных взаимосвязей между объектами.

Полученный в итоге показатель позволяет оценивать техническое состояние поверхности в процессе протекания коррозии и при ее замедлении за счет добавления салицилиден-анилина. Получен результат для образцов с площадью поверхности от $10{,}1 \cdot 10^{-4}$ м^2 до $11{,}9 \cdot 10^{-4}$ м^2. За время эксперимента масса металла уменьшалась в 0,2–0,8 раза с ингибитором и почти в 3,5 раза без него. Фиксировался массовый показатель коррозии от 0,15 г/м^2·ч до 0,48 г/м^2·ч. При этом защитная способность ингибитора оказалась достаточно высокой: минимальная — 77,4 %, максимальная — 94,8 %. Это убедительный показатель. Стоит также упомянуть такое преимущество салицилиден-анилина, как невысокая опасность. Класс его опасности — III (для сравнения: класс опасности анилина на уровень выше — II).

Обсуждение и заключение. Предлагается использовать салицилиден-анилин как средство, повышающее срок безопасной службы нефтепроводов и цистерн. Доказан потенциал этого состава как эффективного ингибитора коррозии, хорошо растворимого в нефти и нефтепродуктах. Отмечены такие свойства салицилиден-анилина, как медленное окисление и умеренная токсичность.

Ключевые слова: игибиторные свойства салицилиден-анилина, защитная способность ингибитора, ингибирующие добавки, способность к комплексообразованию, концентрация ингибитора

Благодарности: авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи. Авторы также выражают особую благодарность коллеге Зайцевой М.М., доценту, кандидату технических наук, за значительный вклад в обсуждение результатов и ценные замечания при оформлении данной работы.

Для цитирования. Курень С.Г., Воляник С.А., Савенкова М.А. Зайцева Э.А. Свойства салицилиден-анилина как ингибитора коррозии в системах транспортировки нефти и нефтепродуктов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):14–23. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-14-23

Original article

Properties of Salicylidene-Aniline as a Corrosion Inhibitor in Oil and Petroleum Products Transportation Systems

Sergey G. Kuren ✉[1], Svetlana A. Volyanik[2], Mariya A. Savenkova[2], Elvira A. Zaitseva

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[3] Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ sergejgrigorevich@yandex.ru

Abstract

Introduction. Risks of accidents and fires during transportation and pumping of oil and petroleum products is a significant problem of technosphere safety. The reasons may be leaks due to corrosion damage to pipelines, tanks and oil storage tanks. In view of the possible serious financial, environmental and social consequences of such incidents, it is important to constantly seek new, more effective approaches to preventing corrosion processes. It is obvious, for example, that at present not all chemical compounds capable of suppressing or inhibiting the destruction of metals and alloys have been thoroughly studied. The presented scientific work is partly aimed at overcoming the lack of data in this area. The objective is to investigate an insufficiently studied compound salicylidene-aniline, which can be a corrosion inhibitor similar to other nitrogen-containing compounds similar in structure and composition.

Materials and Methods. The gravimetric method was used to study the inhibitory, adsorption and complexing properties of salicylidene-aniline. The experiments were carried out with St3 steel plates. The mass of metal samples without an inhibitor and with an inhibitor was recorded before and after exposure in the test media. The effect was determined by the change in the corrosion rate. When setting up experiments, the authors were guided by GOST 9.905–82 "Unified system of corrosion and ageing protection. Corrosion test methods. General requirements". The volume of the corrosive medium was determined according to GOST 9.506–87 "Unified system of corrosion and ageing protection. Corrosion inhibitors of metals in water-petroleum media. Methods of protective ability evaluation". The corrosion criteria were taken from GOST 9.908–85 "Unified system of corrosion and ageing protection. Metals and alloys. Methods for determination of corrosion and corrosion resistance indices". The calculations were based on the valuation principle, which sets the ratio of a multiplicative metrized linear order on a set of particular criteria. An integral indicator based on mathematical and methodological approaches was used for ranking.

Results. The effect of hydrochloric acid medium on steel samples St3 was studied. Four concentrations of the inhibitor were taken: 0 %, 0.01 %, 0.1 %, and 0.2 %. The mass of metal samples without an inhibitor and with an inhibitor was recorded before and after exposure in the test media. The effect was determined by the change in the corrosion rate. The mass index of corrosion was calculated. The surface quality during destruction and corrosion inhibition was determined in five stages: the elements to be evaluated were selected, the purpose of the evaluation was formulated, the elements of the technical condition of the object under study were found, the essence of determining the usefulness or value of the criterion was described, and the essence of optimization was explained. The studied properties were ranked with respect to the multiplicative metrized linear order on a set of particular criteria. For the calculations, the task was set — to determine the components of vector B in accordance with one of the evaluation stages. We are talking about the stage when the usefulness or value of the criterion is analyzed by points on the numerical axis indicating the state of the object "better — worse". We constructed an indicator z approximating a known or specified (learning) matrix of paired relationships between objects. The resulting indicator allowed us to assess the technical condition of the surface during the course of corrosion and when it slowed down due to the addition of salicylidene-aniline. The result was obtained for samples with a surface area from $10.1 \cdot 10^{-4}$ m^2 to $11.9 \cdot 10^{-4}$ m^2. During the experiment, the mass of the metal decreased by 0.2–0.8 times with the inhibitor and almost by 3.5 times without it. The mass index of corrosion was recorded from 0.15 g/m^2·h to 0.48 g/m^2·h. At the same time, the protective ability of the inhibitor was quite high: the minimum was 77.4 %, the maximum was 94.8 %. This is a convincing indicator. It is also worth mentioning such an advantage of salicylidene-aniline as a low danger. Its hazard class is III (for comparison: the hazard class of aniline is a level higher — II).
Discussion and Conclusion. The authors propose to use salicylidene-aniline as a means to increase the safe service life of oil pipelines and tanks. The potential of this composition as an effective corrosion inhibitor, highly soluble in oil and petroleum products, has been proven. Such properties of salicylidene-aniline as slow oxidation and moderate toxicity are noted

Keywords: inhibitory properties of salicylidene-aniline, protective ability of the inhibitor, inhibitory additives, ability to complex formation, inhibitor concentration

Acknowledgements: the authors would like to thank the Editorial Board of the journal and the Reviewer for their professional analysis and suggestions made that helped to improve its quality. The authors also express special gratitude to their colleague MM Zaitseva, associate professor, Cand. Sci. (Eng.) for a significant contribution to the discussion of the results and valuable comments in the design of this work.

For citation. Kuren SG, Volyanik SA, Savenkova MA, Zaitseva EA. Properties of Salicylidene-Aniline as a Corrosion Inhibitor in Oil and Petroleum Products Transportation Systems. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3): 14–23. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-8-3-14-23

Введение. Транспортировка и хранение агрессивных жидкостей, в том числе нефти и нефтепродуктов, генерируют риски аварий с тяжелыми последствиями. Особого внимания требует состояние труб и емкостей, возможность их повреждения. Нефтепроводы, железнодорожные цистерны и автоцистерны постоянно контактируют с агрессивной средой. Их делают из стали, что ставит вопрос о предупреждении или замедлении коррозионных процессов. Последствиями такого разрушения могут быть аварии и катастрофы, сопровождающиеся пожарами и взрывами.

Ингибиторами коррозии могут быть азотсодержащие органические основания, в первую очередь алифатические и ароматические амины и их производные [1–3]. Азометины — это производные аминов. Они перспективны как слабоосновные ингибиторы (рКа-основания на 1–2 порядка меньше, чем у исходных аминов).

Анилин (фениламин) $C_5H_5NH_2$ применяют, в частности, для повышения антидетонации топлива. При содержании 1 % анилина октановое число бензина повышается на 3–4 единицы. Однако в чистом виде анилин лучше не использовать. При длительном хранении такая присадка окисляется, что снижает качество бензина. Производные анилина, например фосфаты, добавляют к растворам сильных электролитов для ингибирования коррозии углеродистой стали.

Класс опасности анилина — II (высокоопасное вещество), а салицилиден-анилина — III (умеренно опасное). Меньшая опасность салицилиден-анилина — убедительное основание для пристального изучения его антикоррозионных свойств. К тому же известные защитные возможности гетероароматических соединений на примере пиперидинов однозначно подтвердили их качества как ингибиторов кислотной коррозии нелегированной стали Ст3 [3]. При этом во взаимодействии с положительно заряженными ионами

корродирующего металла образуются малорастворимые вещества. Они осаждаются в виде сверхтонких пленок (не более 10 нм) и защищают от дальнейшего коррозионного поражения.

Противокоррозионные защитные химические вещества используют как ингибирующие добавки — присадки к агрессивным средам и в комплексе с защищающими покрытиями [2–3]. Комплексообразователи с антикоррозионными свойствами: комплексоны (например, этилендиаминтетраацетат натрия (трилон Б) $Na,H(OOCCH_2)_2N$ — $(CH_2)_2$ — $N(CH_2COO)_2$ Na,H), различные комплексные соединения d-элементов и смеси на их основе. Ведущее место в этой группе занимают фосфонаты щелочных и щелочноземельных металлов [1–5].

В другую группу входят азот- и серосодержащие гетероциклы. Азотсодержащие соединения образуют менее токсичные продукты взаимодействия с коррозионной средой, поэтому они предпочтительнее для разработки и создания эффективных антикоррозионных присадок [3].

В качестве защитных противокоррозионных средств для стали Ст3 хорошо зарекомендовали себя четвертичные аммониевые соли алифатических и гетероароматических азотистых оснований, в том числе производные спиртов, альдегидов, карбоновых кислот. Они хорошо растворяются и устойчивы в рабочих средах, действуют в большом интервале pH [6].

При этом ввиду потенциальных серьезных финансовых, экологических и социальных угроз, связанных с коррозией систем транспортировки нефти и нефтепродуктов, следует непрерывно искать более эффективные подходы к предотвращению разрушающих процессов. Очевидно, например, что досконально изучены далеко не все химические соединения, способные подавлять или тормозить разрушение металлов и сплавов. Представленная научная работа призвана пополнить данные в этой области.

Цель исследования — создание композиций с высокими противокоррозионными свойствами на базе производных анилина и соединений класса азометинов. Производным анилина является представитель класса азометинов — салицилиден-анилин. Полагаем, что этот состав или композиции на его основе целесообразно использовать как ингибитор коррозии стали, что в итоге повысит безопасность транспортировки нефти и нефтепродуктов.

Материалы и методы. Изучались следующие особенности салицилиден-анилина:

– ингибиторные свойства;

– противокоррозионная активность;

– способность к комплексообразованию;

– адсорбционные возможности.

Молекулы ингибитора образуют контактный слой на поверхности металла за счет донорно-акцепторной связи между электронными парами атомов азота и свободными d-орбиталями атома комплексообразователя (в данном случае — железа). Такие соединения образуют более прочную пленку, чем у многих других ингибиторов. В результате на поверхности стали формируются микрогальванические пары и происходит анодная и катодная деполяризация, за счет которой проявляются защитные свойства ингибитора.

В работе задействовали гравиметрический метод исследования [1]. Он основан на фиксации массы металлических образцов без ингибитора и с ингибитором до и после выдержки в испытуемых средах. По изменению скорости коррозии оценивается противокоррозионная активность испытуемого соединения. Для каждого образца время выдерживания в ингибированной среде равно времени в среде без антикоррозионного агента [1–3].

Для исследования по ГОСТ 9.905–82 «Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний» использовались пластины из стали марки Ст3. Объем коррозионной среды (0,25н HCl) — 30 $см^3$ в соответствии с ГОСТ 9.506–87 «Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов в водно-нефтяных средах». В среду добавляли по 0 %, 0,01 %, 0,1% и 0,2 % салицилиден-анилина. Критерии коррозии — по ГОСТ 9.908–85 «Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости».

Результаты исследования. Рассматривалось воздействие солянокислой среды на образцы стали. Фиксировали результаты с учетом разных концентраций салицилиден-анилина и таким образом определяли противокоррозионный эффект (рис. 1).

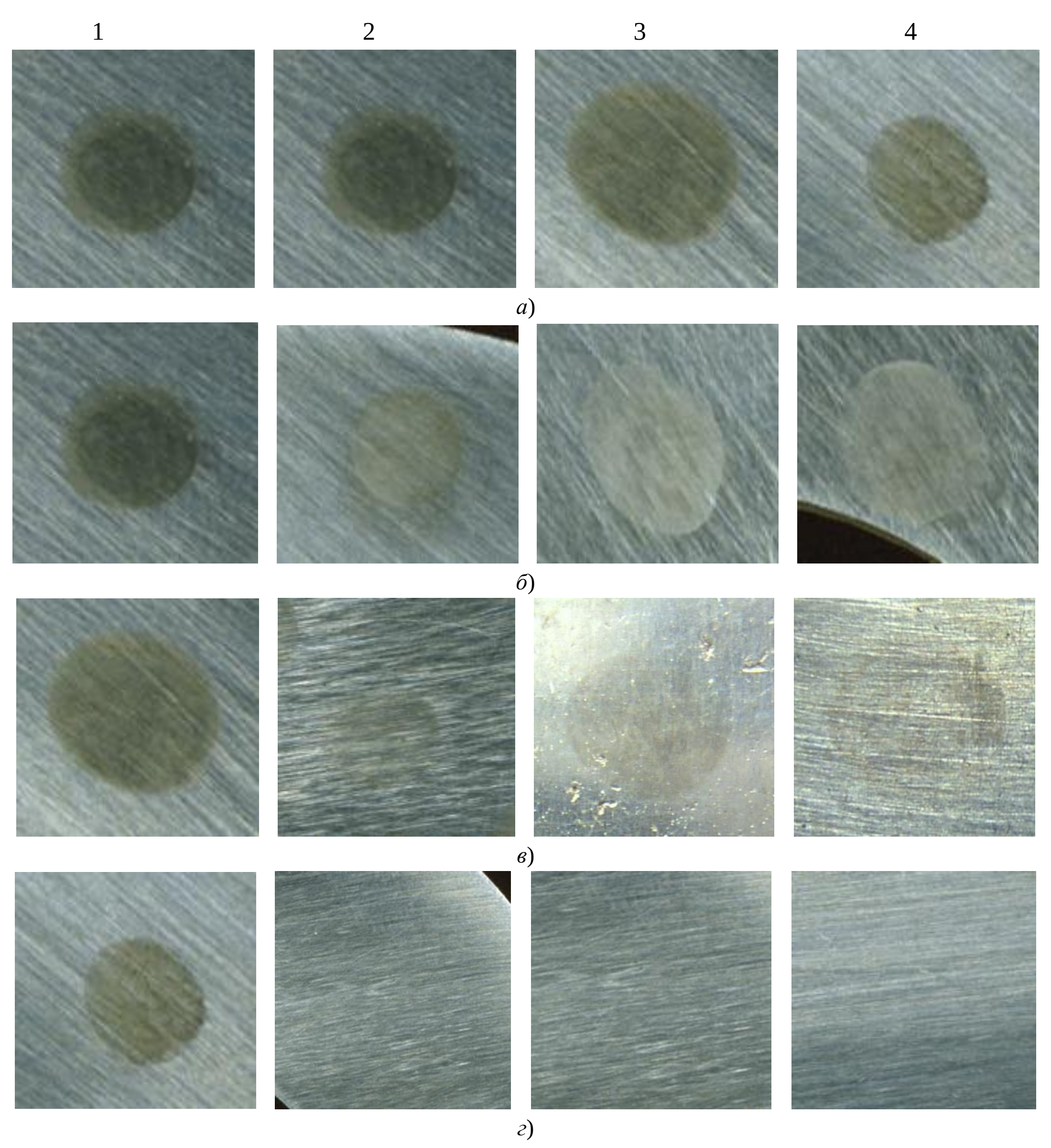


Рис. 1. Фото коррозионного поражения — вид пятна ржавчины на поверхности образцов стали Ст3 в солянокислой среде при концентрациях ингибитора, %: *а* — 0; *б* — 0,01; *в* — 0,1; *г* — 0,2. Образцы пронумерованы сверху, их изображения после воздействия расположены вертикально

Массовый показатель коррозии *j* рассчитывали по формуле:

$$j = \Delta m \,/\, (S \cdot \tau), \, г \,/\, м^2 \cdot ч \text{ или } г \,/\, м^2 \cdot год,$$

где Δm — уменьшение массы металла (г) при коррозии металла в течение времени τ (час или год) на поверхности *S* ($м^2$).

Качество поверхности при коррозии и ее ингибировании (рис. 1), оценивается в пять этапов [7].

1. На основе предварительного анализа ставится проблема, указываются оцениваемые элементы.
2. Структурный анализ позволяет сформулировать основную цель оценивания и возможности ее достижения.
3. Для анализа неопределенности ведется поиск объединяющих элементов действительного технического состояния объекта.
4. Полезность или ценность критерия анализируется по точкам числовой оси, указывающим на состояние объекта «лучше — хуже».
5. Оптимизация представляет собой поиск пути к достижению необходимого технического состояния.

Методы построения структуры целей и формирование перечня критериев рассмотрены в [8]. Предполагается, что задан исходный массив объектов и в исследовании выявляются лучшие из них по техническому состоянию. Ранжирование проводится по специальному интегральному показателю, основанному на математическом и методическом подходах. Главные принципы отбора описаны в [9].

Основной элемент рассматриваемого подхода — правило (или принцип) оценивания π, задающий отношение мультипликативного метризованного линейного порядка на множестве частных критериев.

Для пары объектов a_ν и a_μ выбор базируется на следующих принципах:

– $a_\nu > a_\mu$ — первый объект по рассматриваемым факторам «лучше» второго;

– $a_\nu \sim a_\mu$ — объекты оценены одинаково;

– $a_\nu < a_\mu$ — первый объект по рассматриваемым факторам «хуже» второго.

Пары объектов характеризуются векторами сравнений $S_{\nu\mu}$. Для исследования полезен принцип обобщенного критерия и так называемые лексикографические подходы — с сильным предпочтением на множестве частных критериев. В данном варианте объекты равноценны ($a_\nu \sim a_\mu$), а их оценки соответствуют установленным минимальным величинам [10].

Рассмотрим условие:

$$a_\nu \sim a_\mu \Leftrightarrow x_i^\nu \geq d_i,\ \ x_i^\mu \geq d_i\ ,i = 1, \dots, m,$$

где d_i — заданное пороговое значение (уровень достаточности); m — количество рассматриваемых показателей; $x_{i\nu}$ и $x_{i\mu}$ — оценки сравниваемых объектов (ν-го и μ-го).

Прямое использование этого принципа ограничивается возможностью его применения на практике, так как предполагает сильное предпочтение на множестве критериев $K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ в виде:

$$K_1 \geq K_2 \geq K_3 \geq \cdots \geq K_m.$$

Целесообразнее задать метризованное мультипликативное отношение линейного порядка, то есть применить обобщенный критерий.

В этом случае

$$a_\nu \succ a_\mu \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{m} a_i K_i(a_\mu);\ \ a_\nu \sim a_\mu \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{m} a_i\, K_i(a_\nu) = \sum_{i=1}^{m} a_i K_i\,(a_\mu).$$

Здесь a_i — коэффициенты, удовлетворяющие, например, условию

$$\sum_{i=1}^{m} a_i = 1.$$

Задача заключается в определении компонент вектора B в соответствии с 4-м этапом оценки и построении показателя z, аппроксимирующего объективно известную или специально задаваемую (обучающую) матрицу парных взаимосвязей между искусственными объектами (в [11] это были транспортные средства):

$$Q = \| q_{rk} \|_{p,p}\ .$$

Здесь p — количество рассматриваемых искусственных объектов, которое определяет размер матрицы Q; q_{rk} — элементы матрицы; r, k — искусственные объекты на числовой оси «лучше — хуже».

На оси показателя z квадрат расстояния между r-м и k-м искусственными объектами (вариантами защиты) имеет вид:

$$d_{rk}(B) = (z_r - z_k)^2 = \left[\sum_{j=1}^{m} b_j\left(x_{rj} - x_{kj}\right)\right]^2,$$

$$D(B) = \| d_{rk} \|_{p,p}\ .$$

Матрица D (B) оценивается с помощью функционала

$$J(B) = \sum_{r=1}^{p-1} \sum_{k=r+1}^{p} [d_{rk}(B) - q_{rk}]^2.$$

Искомым интегральным критерием является функция Z, если J(B) минимальна и вектор B соответствует поставленным условиям. Полученный показатель применяем для оценивания технического состояния качества поверхности в результате протекания коррозии и ее замедления за счет добавления салицилиден-анилина (таблица 1, рис. 1).

Таблица 1

Антикоррозионные свойства салицилиден-анилина для стали Ст3

Номер образца	S, 10^{-4} м^2	τ, ч	$\Delta m = m_0 - m$, г	Концентрация ингибитора, %	Массовый показатель коррозии j, г/м^2·ч ($j = \Delta m / S \cdot \tau$)	Защитная способность ингибитора Z, %
1	10,22	120	3,4590	0	2,8205	–
2	10,11	120	0,7815	0,01	0,4793	77,4
3	11,9	120	0,3363	0,1	0,2542	90,2
4	11,13	120	0,1805	0,2	0,1482	94,8

Как видно из таблицы и рис. 1, коррозионное поражение поверхности стали уменьшается при увеличении концентрации салицилиден-анилина.

Для объяснения антикоррозионной активности и хорошей адсорбционной способности N-салицилиден-анилина на стальной поверхности теоретически изучили его фотоинициированную структурную нежесткость. Это позволило выяснить, в какой таутомерной форме данная структура имеет большую энергию комплексообразования адсорбционных комплексов на поверхности защищаемого металла [12–16].

Фотохромный переход кетонной формы в енольную обеспечивается переносом протона между изомерными формами молекулы N-салицилиден-анилина.

Полуэмпирический метод квантовой химии PM3 (параметрический метод 3) задействовали для детального определения:

– последовательности элементарных стадий основного фотохромного процесса;

– геометрических характеристик всех промежуточных и конечных фотоокрашенных систем;

– распределения зарядов на атомах [17].

Салицилиден-анилин, как и другие анилы, представляет интерес из-за внутримолекулярной водородной связи, образованной между атомами кислорода и азота в более стабильной цис-енольной форме. Фактически формы OH и NH находятся в равновесии. В зависимости от положения атома водорода в этой связи O—H—N анилы проявляют две таутомерные формы: енол-иминную и кето-енаминную (рис. 2). Более стабильна цис-форма. Но транс-форма обладает лучшей адсорбционной способностью. Таутомерия возникает под действием таких внешних факторов, как облучение, температура и давление.

Рис. 2. Кето-енольная таутомерия: *а* — СА (енол); *б* — кето-форма

При понижении температуры енольная форма переходит в кетонную. Нами доказано, что она лучше адсорбируется на стальной поверхности. Цис-енол бесцветен. При облучении ультрафиолетом превращается в транс-кетоформу красного цвета. Кето-изомер может обратимо обесцвечиваться термически или фотохимически при действии видимого света [18].

Обсуждение и заключение. Результаты исследования позволяют утверждать, что салицилиден-анилин активно ингибирует коррозию стали Ст3. Степень защиты достигает 77,4–94,8 %.

Квантовохимические расчеты полуэмпирическим методом PM3 позволили объяснить фотохромизм салицилиден-анилина за счет кето-енольной таутомерии. Вследствие мономолекулярной прототропной дихотомии «кислота ↔ основание» салицилиден-анилин обладает фотохромизмом и люминесценцией. Это отличает его от других азометинов

Выявлена структура адсорбционного комплекса с большей энергией стабилизации, что объясняет лучшую адсорбционную способность кето-формы ингибитора.

Список литературы

1. Сабанов С.В., Никулин С.А., Карнавский Е.Л. Определение первоочередности вывода в ремонт оборудования противокоррозионной защиты на участке газопровода в условиях ограничения финансирования. *Практика противокоррозионной защиты.* 2020;25(2):7–17. https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-1

2. Цыганкова Л.Е., Ким Я.Р. Новое поколение ингибиторов коррозии металлов для нефтехимической промышленности. В: *Тр. XVIII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии.* Т. 3. Москва; 2007. С. 467.

3. Soumen Mandal, Jitendra Kumar Singh, Dong-Eun Lee, Taejoon Park. Ammonium Phosphate as Inhibitor to Mitigate the Corrosion of Steel Rebar in Chloride Contaminated Concrete Pore Solution. *Molecules*. 2020;25(17):3785. https://doi.org/10.3390/molecules25173785

4. Karthick Subbiah, Han-Seung Lee, Soumen Mandal, Taejoon Park. Conifer Cone (Pinus resinosa) as a Green Corrosion Inhibitor for Steel Rebar in Chloride-Contaminated Synthetic Concrete Pore Solutions. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13(36):43676–43695. https://doi.org/10.1021/acsami.1c11994

5. Пахомов В.С, Шевченко А.А. *Химическое сопротивление материалов и защита от коррозии.* Москва: Химия, КолосС; 2009. 444 с.

6. Vigato P.A., Tamburini S., Bertolo L. The Development of Compartmental Macrocyclic Schiff Bases and Related Polyamine derivaties. *Coordination Chemistry Reviews*. 2007;251(11-12):1311–1492. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2006.11.016

7. Дерюшев В.В., Зайцева М.М., Косенко Е.Е. Мамбергер С.К. Оценка свойств антикоррозионных покрытий металлоконструкций. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2020;(4):24–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-24-29

8. Дерюшев В.В., Сидельникова Е.Г. Обобщенный показатель достаточности для оценивания технического состояния строительной и подъемно-транспортной техники. *Научное обозрение.* 2013;(9):164–167.

9. Крянев А.В., Лукин Г.В., Удумян Д.К. *Метрический анализ и обработка данных.* Москва: Физматлит; 2012. 308 с.

10 Дерюшев В.В., Косенко Е.Е., Косенко В.В. и др. Принятие технических решений в условиях неопределенности при наличии риска. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2019;(2):56–61. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-56-61

11. Касьянов В.Е., Демченко Д.Б., Косенко Е.Е. и др. Метод оптимизации надежности машин с применением интегрального показателя. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2020;(1):23–31. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31

12 Зайцева М.М., Мегера Г.И., Копылов Ф.С. и др. Повышение безопасности работы техники путем обеспечения ее надежности. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2019;2:33–37.

13. Колесников В.И., Мигаль Ю.Ф., Савенкова М.А. и др. Взаимодействие молекул фосфорсодержащих неорганических присадок с поверхностью железа: квантовохимический анализ. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения.* 2013;3(51):153–160.

14. Delley B. Time-dependent Density Functional Theory with DMol3. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2010;22(38):384208. https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/38/384208

15. Курень С.Г. *Изучение адсорбционных комплексов на поверхности металлов*. В: «Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии». Тр. X юбилейной междунар. науч. конф. Ставрополь; 2010. С. 247–249.

16. Курень С.Г. *Квантовохимическое моделирование адсорбционных процессов.* Ростов-на-Дону; 2012. 164 с.

17. Bravaya K.B., Bochenkova A.V., Granovsky A.A., Savitsky A.P., Nemukhin A.V. Modeling photoabsorption of the asFP595 chromophore 11. *Journal of Physical Chemistry A.* 2008;112(37):8804–8810. https://doi.org/10.1021/jp804183w

18. Bagaturyants A., Vener M. *Multiscale modeling in nanophotonics. Materials and simulations*. Abingdon: Jenny Stanford Publishing; 2017. 270 p. https://doi.org/10.1201/9781315109763

References

1. Sabanov SV, Nikulin SA, Karnavskiy EL. Determination of the priority of withdrawal to repair of equipment of anti-corrosive protection on the section of the gas pipeline in the conditions of restriction of financing. *Theory and Practice of Corrosion Protection.* 2020;25(2):7–17. https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-1

2. Tsygankova LE, Kim YaR. Novoe pokolenie ingibitorov korrozii metallov dlya neftekhimicheskoi promyshlennosti. In: *Tr. XVIII Mendeleevskogo s'ezda po obshchei i prikladnoi khimii*. Vol. 3. Moscow; 2007. P. 467.

3. Soumen Mandal, Jitendra Kumar Singh, Dong-Eun Lee, Taejoon Park. Ammonium Phosphate as Inhibitor to Mitigate the Corrosion of Steel Rebar in Chloride Contaminated Concrete Pore Solution. *Molecules*. 2020;25(17):3785. https://doi.org/10.3390/molecules25173785

4. Karthick Subbiah, Han-Seung Lee, Soumen Mandal, Taejoon Park. Conifer Cone (Pinus resinosa) as a Green Corrosion Inhibitor for Steel Rebar in Chloride-Contaminated Synthetic Concrete Pore Solutions. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13(36):43676–43695. https://doi.org/10.1021/acsami.1c11994

5. Pakhomov VS, Shevchenko AA. *Khimicheskoe soprotivlenie materialov i zashchita ot korrozii*. Moscow: Khimiya, KolosS; 2009. 444 p.

6. Vigato PA, Tamburini S, Bertolo L. The Development of Compartmental Macrocyclic Schiff Bases and Related Polyamine derivatives. *Coordination Chemistry Reviews*. 2007;251(11-12):1311–1492. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2006.11.016

7. Deryushev VV, Zaytseva M., Kosenko EE, Mamberger SK. Evaluation of the properties of anti-corrosion coatings of steel structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;(4):24–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-24-29

8. Deryushev VV, Sidelnikova EG. Generalized sufficiency indicator for the assessment of technical condition of construction and lifting-transportation machinery. *Nauchnoe obozrenie*. 2013;(9):164–167.

9. Kryanev AV, Lukin GV, Udumyan DK. *Metricheskii analiz i obrabotka dannykh*. Москва: Fizmatlit; 2012. 308 p.

10 Deryushev VV, Kosenko EE, Kosenko VV, Zaytseva MM. Technical decisions in uncertain environment at risk. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;(2):56–61. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-56-61

11. Kasyanov VE, Demchenko DB, Kosenko EE, Teplyakova SV. Method of machine reliability optimization using integral indicator. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;(1):23–31. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31

12. Zaytseva MM, Megera GI, Kopylov FS, Krymskiy VS. Improving safety of equipment by reliability provision. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;2:33–37. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-33-36

13. Kolesnikov VI, Migal YuF, Savenkova MA, Solodovnikova DN. Interaction of phosphorus-containing inorganic additives with iron surface: quantum-chemical analysis. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2013;3(51):153–160.

14. Delley B. Time-dependent Density Functional Theory with DMol3. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2010;22(38):384208. https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/38/384208

15. Kuren SG. *Izuchenie adsorbtsionnykh kompleksov na poverkhnosti metallov*. In: " Khimiya tverdogo tela: nanomaterialy, nanotekhnologii ". Tr. X yubileinoi mezhdunar. nauch. konf. Stavropol; 2010. P. 247–249.

16. Kuren SG. *Kvantovokhimicheskoe modelirovanie adsorbtsionnykh protsessov*. Rostov-on-Don; 2012. 164 p.

17. Bravaya KB, Bochenkova AV, Granovsky AA, Savitsky AP, Nemukhin AV. Modeling photoabsorption of the asFP595 chromophore 11. *Journal of Physical Chemistry A*. 2008;112(37):8804–8810. https://doi.org/10.1021/jp804183w

18. Bagaturyants A, Vener M. *Multiscale modeling in nanophotonics. Materials and simulations*. Abingdon: Jenny Stanford Publishing; 2017. 270 p. https://doi.org/10.1201/9781315109763

Поступила в редакцию 07.07.2023
Поступила после рецензирования 24.07.2023
Принята к публикации 03.08.2023

Об авторах:

Сергей Григорьевич Курень, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), AuthorID, ORCID, sergejgrigorevich@yandex.ru

Светлана Алексеевна Воляник, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой химии Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), AuthorID, ORCID, him@rgupa.ru

Мария Андреевна Савенкова, кандидат химических наук, доцент кафедры химии Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), AuthorID, ORCID, him@rgupa.ru

Эльвира Александровна Зайцева, студентка химического факультета Южного федерального университета (344090, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 7), ORCID, gems10@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

С.Г. Курень — научное руководство, формулирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение квантовохимических расчетов и эксперимента, корректировка выводов.

С.А. Воляник — проведение эксперимента, подготовка текста, формулирование выводов.

М.А. Савенкова —проведение эксперимента, анализ результатов исследований, доработка текста.

А.А. Зайцева — литературный и патентный поиск, подготовка текста, анализ результатов исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 07.07.2023
Revised 24.07.2023
Accepted 03.08.2023

About the Authors:

Sergey G. Kuren, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Operation Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), AuthorID, ORCID, sergejgrigorevich@yandex.ru

Svetlana A. Volyanik, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor, head of the Chemistry Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya Sq., Rostov-on-Don, 344038, RF), AuthorID, ORCID, him@rgupa.ru

Mariya A. Savenkova, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor of the Chemistry Department, Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya Sq., Rostov-on-Don, 344038, RF), AuthorID, ORCID, him@rgupa.ru

Elvira A. Zaitseva, Student of the Chemical Faculty, Southern Federal University (7, Zorge St., Rostov-on-Don, 344090, RF), ORCID, gems10@rambler.ru

Claimed contributorship:

SG Kuren: academic advising; formulation of the basic concept, goals and objectives of the study; conducting quantum chemical calculations and experiment; conclusions correction.

SA Volyanik: conducting an experiment; text preparation; conclusions formulation.

MA Savenkova: conducting an experiment; research results analysis, finalizing the text.

AA Zaitseva: literary and patent search; text preparation; research results analysis.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 331.45

https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-24-33

Научная статья

Профессиональная заболеваемость женщин, связанная с условиями труда в сельском хозяйстве

В.Ю. Контарева ✉

Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Российская Федерация

✉ valia_k@bk.ru

Аннотация

Введение. Около трети сотрудниц средних и крупных сельскохозяйственных предприятий работают в опасных и вредных условиях. Стоит уточнить, что ситуация в этой сфере постоянно меняется, информация может устаревать. Указанную проблему призвана решить представленная научная работа. Для изучения актуальных данных следует рассматривать и систематизировать новые сведения. Цель исследования — анализ недавно опубликованной официальной статистики о воздействии условий труда на здоровье работников агросектора и, в частности, женщин. Кроме того, рассматриваются проблемы формирования и развития профессиональных заболеваний женщин, занятых в сельском хозяйстве.

Материалы и методы. В качестве материалов исследования использовались сведения Федеральной службы государственной статистики, Министерства здравоохранения РФ, а также труды зарубежных и российских ученых, которые изучали особенности работы в сельском хозяйстве. Данные официальной статистики обобщались в виде таблиц, визуализировались как диаграммы. Иллюстративный материал позволил, в частности, сопоставить показатели, выявить наиболее существенные риски, связанные с работой женщин в агропромышленном комплексе.

Результаты исследования. Около 35 % (то есть более трети) персонала средних и крупных предприятий агропромышленного комплекса — это женщины. Многие из них трудятся во вредных и опасных условиях. С 2015 по 2021 гг. соответствующий минимальный зафиксированный показатель — 26,4 % из всех женщин, занятых в сельском хозяйстве, максимальный — 37 %. Обобщенные статистические данные позволяют утверждать, что с 2015 по 2021 гг. ситуация существенно не улучшается, понижающий тренд не формируется. Если же говорить о тяжелых работах, то доля женщин, выполняющих такие функции, увеличилась с 13,8 до 17,7 %, то есть к 2021 году ситуация заметно ухудшилась. Отметим прогресс с напряженными трудовыми процессами в сельском хозяйстве. Доля женщин, занятых такими работами, сократилась почти вдвое: с 3,5 % до 1,8 %. Особенно вредным для работниц агросектора производственным фактором следует признать физические перегрузки, которые функционально перенапрягают органы и системы организма. Наиболее проблемная с точки зрения женского здоровья отрасль — животноводство.

Обсуждение и заключение. Результаты работы позволяют сделать вывод о неудовлетворительных условиях труда женщин в сельском хозяйстве. Ситуацию могут улучшить государственный контроль, взаимная заинтересованность работодателей и работников в организации рабочих мест и соблюдении требований охраны труда. Системный подход должен сократить число профессиональных заболеваний среди женщин, улучшить показатели по здоровью работниц агросферы.

Ключевые слова: здоровье женщин, профессиональные заболевания, вредные и опасные условия труда, физические перегрузки

Благодарности: автор выражает благодарность Федеральной службе государственной статистики за открытый доступ (rosstat.gov.ru) к данным об условиях труда, производственном травматизме и профессиональных заболеваниях.

Для цитирования. Контарева В.Ю. Профессиональная заболеваемость женщин, связанная с условиями труда в сельском хозяйстве. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):24–33. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-24-33

Original article

Occupational Morbidity of Women Associated with Working Conditions in Agriculture

Valentina Yu. Kostareva
Don State Agrarian University, Persianovskii, Russian Federation
✉ valia_k@bk.ru

Abstract
Introduction. About a third of employees of medium and large agricultural enterprises work in hazardous and harmful conditions. It is worth clarifying that the situation in this area is constantly changing, information may become outdated. The presented scientific work is designed to solve this problem. New information should be considered and systematized to study current data. The work objective is to analyze recently published official statistics on the impact of working conditions on the health of agricultural sector workers and, in particular, women. In addition, the problems of the formation and development of occupational diseases of women employed in agriculture are considered.
Materials and Methods. The data of the Federal State Statistics Service, the Ministry of Health of the Russian Federation, as well as the works of foreign and Russian scientists who studied the peculiarities of work in agriculture were used as research materials. Official statistics data were summarized in the form of tables, visualized as diagrams. The illustrative material allowed us, in particular, to compare the indicators, to identify the most significant risks associated with the work of women in the agro-industrial complex.
Results. About 35% (that is, more than a third) of the personnel of medium and large enterprises of the agro-industrial complex are women. Many of them work in harmful and dangerous conditions. From 2015 to 2021, the corresponding minimum recorded figure was 26.4% of all women employed in agriculture, the maximum was 37%. Generalized statistical data suggested that from 2015 to 2021 the situation was not significantly improving, a downward trend was not formed. If to speak about hard work, the proportion of women performing such functions increased from 13.8 % to 17.7%, that is, by 2021 the situation noticeably worsened. We noted the progress with strenuous labor processes in agriculture. The proportion of women engaged in such jobs almost halved: from 3.5% to 1.8%. Physical overload, which functionally overstrain the organs and systems of the body, should be recognized as a particularly harmful factor for agricultural sector workers. The most problematic industry from the point of view of women's health was animal husbandry.
Discussion and Conclusion. The results of the work allow us to conclude about the unsatisfactory working conditions of women in agriculture. The situation can be improved by state control, mutual interest of employers and employees in the organization of workplaces and the compliance with labor protection requirements. A systematic approach should reduce the number of occupational diseases among women, improve the health indicators of agricultural workers

Keywords: women's health, occupational diseases, harmful and hazardous working conditions, physical overload

Acknowledgements: the author would like to thank the Federal State Statistics Service for open access (rosstat.gov.ru) to data on working conditions, occupational injuries and occupational diseases.

For citation. Kontareva VYu. Occupational Morbidity of Women Associated with Working Conditions in Agriculture. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3):24–33. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-24-33

Введение. Здоровье женщин — важная медико-социальная проблема. От ее решения зависят многие сферы, в том числе социально-демографическая ситуация [1]. Здоровье определяется рядом разнородных факторов, в том числе:

– экономика;
– экология;
– социальное обеспечение (доходы, доступность медицинских услуг);
– питание;
– отношение к вредным привычкам.

Человек может до 1/4 жизни проводить на рабочем месте, поэтому здоровье во многом зависит от производственной среды. Проблемы охраны труда и здоровья женщин не только активно обсуждаются в обществе, но требуют пристального внимания властей. Необходимо принять во внимание, что ситуация в сфере постоянно

меняется, и информация устаревает. Использование данных, не соответствующих текущему состоянию проблемы, будет препятствовать ее решению. Представленная научная работа призвана исключить указанный недостаток. Актуальность предполагает рассмотрение и систематизацию новых сведений. Так, в декабре 2023 года в России утвердили Национальную стратегию действий в интересах женщин на 2023–2030 годы. Один из ее приоритетов — сохранение здоровья женщин[1]. В Трудовом кодексе есть положения об охране труда и здоровья женщин[2]. Указ Президента России от 04.03.1993 № 337 «О первоочередных задачах государственной политики в отношении женщин» декларирует необходимость первоочередного обеспечения прав женщин на охрану труда, защиту их жизни и здоровья с учетом функции материнства[3]. Следует признать, что в ряде случаев условия труда женщин остаются небезопасными и вредными, а состояние здоровья — неудовлетворительным.

Цель исследования — анализ недавно опубликованных официальных статистических данных о воздействии условий труда на здоровье женщин. Кроме того, рассматриваются проблемы формирования и развития профессиональных заболеваний работниц, занятых в агросекторе.

Материалы и методы. Рассмотрена посвященная проблеме российская и зарубежная литература. Эти материалы сопоставлены с данными Федеральной службы государственной статистики и Министерства здравоохранения Российской Федерации. Такой подход позволил систематизировать и показать в динамике информацию о количестве женщин, работающих в опасных и вредных условиях труда, и о потенциальной угрозе их здоровью. Выполнен сравнительный анализ, установивший сходные и различные риски для мужчин и женщин, занятых в агропромышленном комплексе. Информация обобщена, представлена в виде таблиц и диаграмм. Обработка значительного цифрового массива дает основания говорить о репрезентативности материала и обоснованности предложенных выводов.

Результаты исследования. В сельском хозяйстве задействована значительная часть работоспособного населения страны. Так, к концу 2021 года в агропромышленном комплексе России работали почти 900 тыс. человек. Здесь и далее — аналитика без учета малых и микропредприятий, так как Росстат не опубликовал соответствующие данные. Из этих 900 тыс. 313 тыс. человек (около 35 %, то есть более трети) — женщины[4, 5].

Сохраняется значительная доля занятых на работах с условиями труда, не отвечающими требованиям законодательства, в целом по стране (рис. 1) и в агросекторе (рис. 2) [2].

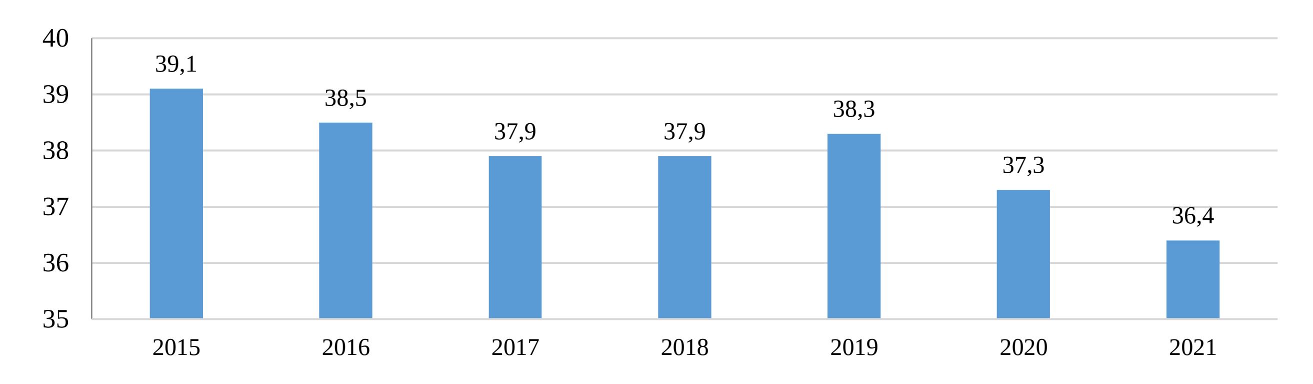


Рис. 1. Доля сотрудников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, %

[1] *Об утверждении Национальной стратегии действий в интересах женщин на 2023–2030 годы*. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 4356-р от 29.12.2022. Консультант Плюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_436691/0ab1d11f34aa37bd186ca7948792439bf4b2d4c1/ (дата обращения: 31.05.2023).
[2] *Трудовой кодекс Российской Федерации*. № 197-ФЗ от 30.12.2001. Консультант Плюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения: 31.05.2023).
[3] *О первоочередных задачах государственной политики в отношении женщин*. Указ Президента Российской Федерации № 337 от 04.03.1993. Консультант Плюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_1591/ (дата обращения: 31.05.2023).
[4] *Условия труда. Производственный травматизм*. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения: 31.05.2023).
[5] *Состояние условий труда работников организаций Российской Федерации по отдельным видам экономической деятельности*. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/11110/document/13264 (дата обращения: 31.05.2023).

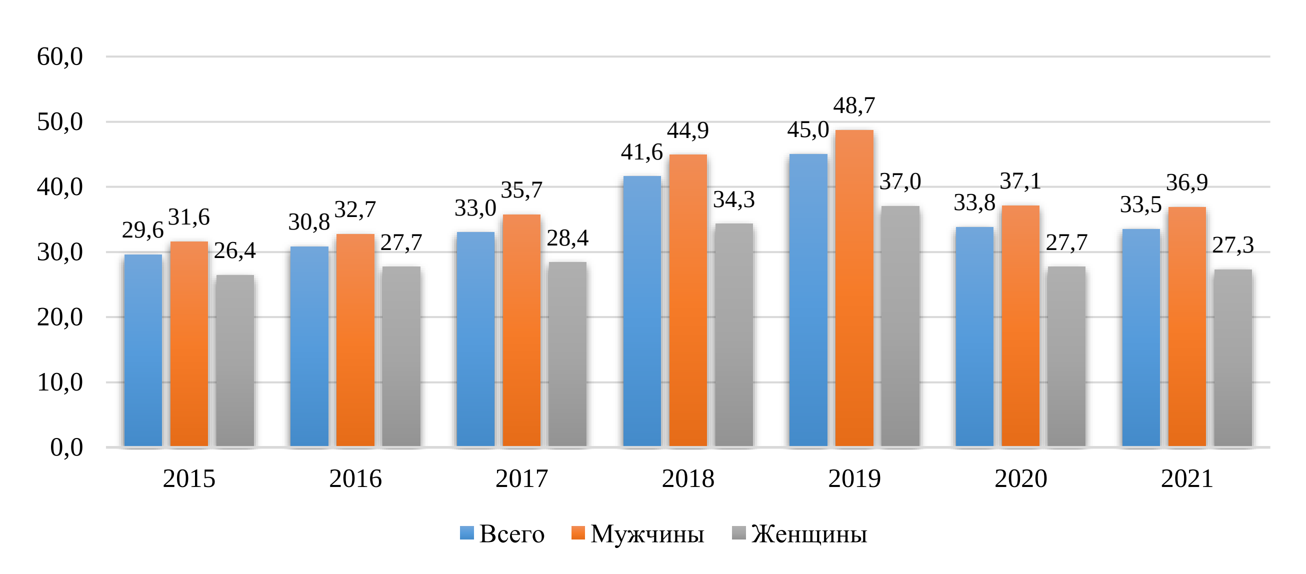


Рис. 2. Доля сотрудников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда в сельском хозяйстве, %

Этот и следующие аналогичные рисунки требуют пояснений. Каждый столбик диаграммы показывает долю сотрудников агросектора, работающих в различных неблагоприятных условиях. Все считается от 100 %. В данном случае, например, в 2015 году из общей списочной численности (100 %) персонала 29,6 % трудились во вредных и (или) опасных условиях. Из 100 % мужчин — 31,6 %, из 100% женщин — 26,4 %.

С 2015 по 2021 гг. в сельском хозяйстве вредные или опасные условия труда были у 29,6–45 % персонала, причем снижающаяся линия тренда не фиксируется (рис. 2). За указанные годы около трети работниц агропредприятий (26,4–37 %) трудились в опасных и вредных условиях.

Опасные и вредные условия труда в сельском хозяйстве связаны с факторами производственной среды (рис. 3, таблица 1), тяжестью (рис. 4) и напряженностью трудового процесса (рис. 5).

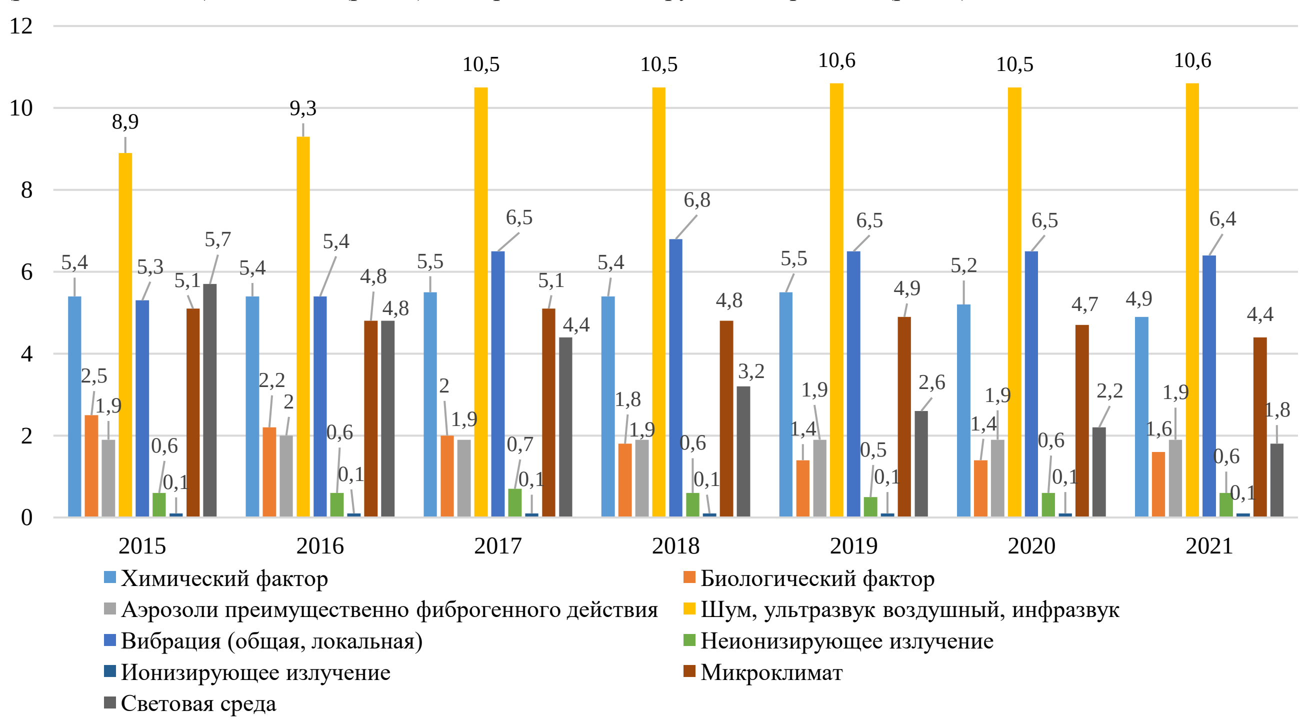


Рис. 3. Доля работников сельского хозяйства, испытывающих воздействие различных вредных факторов производственной среды, %

Как видим, чаще всего на людей влияют акустические факторы, вибрация, химические вещества и микроклимат.

Таблица 1

Число работниц агросектора, подвергающихся воздействию неблагоприятных факторов производственной среды

Год	Число чел.	Находятся под воздействием указанных факторов, чел./%*									
		Всего	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2015	375773	99011/26,4	53411/ 4,6	12313/ 3,3	5690/ 1,5	20236/ 5,4	1901/ 0,5	2431/ 0,7	278/ 0,1	21817/ 5,8	25787/ 6,9
2016	389677	107798/27,7	17115/ 4,4	12211/ 3,1	6631/ 1,7	20397/ 5,2	1930/ 0,5	2017/ 0,5	235/ 0,1	21552/ 5,5	22320/ 5,7
2017	359596	102176/28,4	15852/ 4,4	10730/ 3,0	5129/ 1,4	21192/ 5,9	1790/ 0,5	1446/ 0,4	131/ 0,0	21319/ 5,9	18142/ 5,1
2018	342316	97298/28,4	15250/ 4,5	8577/ 2,5	5128/ 1,5	20507/ 6,0	1958/ 0,6	656/ 0,2	98/ 0,0	20308/ 5,9	11994/ 3,5
2019	342532	96567/28,2	15321/ 4,5	7138/ 2,1	5273/ 1,5	21335/ 6,2	2021/ 0,6	545/ 0,2	153/ 0,0	22669/ 6,6	9905/ 2,9
2020	325955	90312/27,7	13726/ 4,2	7123/ 2,2	5144/ 1,6	19554/ 6,0	1903/ 0,6	486/ 0,1	165/ 0,1	21129/ 6,5	7826/ 2,4
2021	312653	85227/27,3	12314/ 3,9	7014/ 2,2	4456/ 1,4	18523/ 5,9	1578/ 0,5	280/ 0,1	94/ 0,0	19132/ 6,1	5945/ 1,9
* 1 — химический; 2 — биологический; 3 — аэрозоли, преимущественно фиброгенного действия; 4 — шум, ультразвук, воздух, инфразвук; 5 — вибрация (общая и локальная); 6 — неионизирующее излучение; 7 — ионизирующее излучение; 8 — микроклимат; 9 — световая среда.											

Итак, не соответствуют нормативам рабочие места 26,4–28,4 % сотрудниц. Неблагоприятные условия — это в первую очередь шум, воздушный ультразвук, инфразвук, химия и микроклимат. Из описанных выше факторов реже всего женщины испытывают воздействие вибрации.

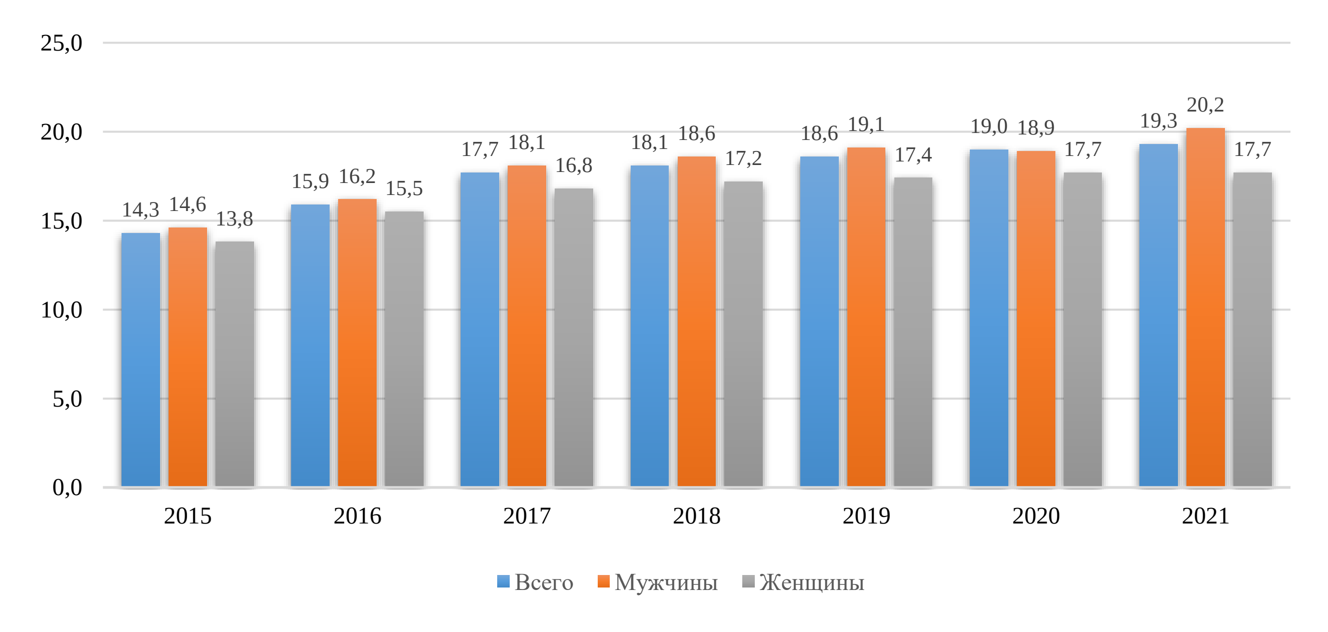


Рис. 4. Доля занятых на тяжелых работах в сельском хозяйстве, %

https://bps-journal.ru/

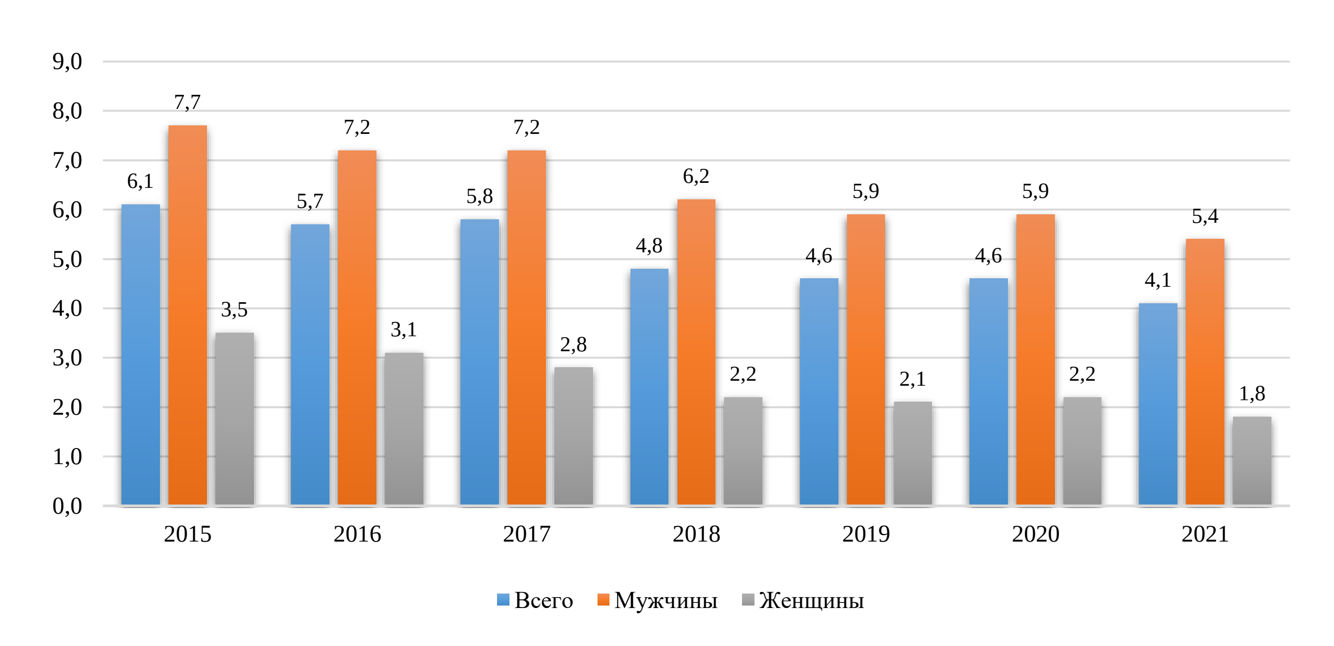


Рис. 5. Доля занятых в напряженных трудовых процессах в сельском хозяйстве, %

Отметим, во-первых, рост доли занятых тяжелым трудом. В целом этот показатель увеличился с 14,3 % до 19,3 %. Соответствующие цифры для женщин — с 13,8 % до 17,7 %. Кроме того, из рис. 4 и 5 следует, что доля участников напряженных трудовых процессов сократилась с 6,1 % до 4,1 % в целом и с 3,5 % до 1,8 %, если говорить о женщинах.

Описанные выше негативные явления создают риски развития профессиональных и профессионально обусловленных заболеваний. Среди отраслей российской экономики сельское хозяйство занимает четвертое место по уровню таких недугов, а также связанной с ними утраты трудоспособности[6]. Особенно много фиксируется болезней, обусловленных физическими перегрузками, функциональным перенапряжением органов и систем организма (около 51 %). На втором месте — воздействие физических факторов (около 22,5 %). На третьем — вредное влияние аэрозолей, преимущественно фиброгенных (около 13 %), и химических веществ (около 8,5 %) [2].

Из первично выявленных профессиональных патологий работников сельского хозяйства чаще всего (64,8 %) встречаются болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани (радикулопатия, мышечно-тонические синдромы, миалгия, миофиброз предплечий, эпикондилез надмыщелков плечевых костей и т. д.). 10,3 % приходится на болезни органов дыхания (профессиональный бронхит, бронхиальная астма и т. д.). В 11,6 % фиксируются травмы, отравления и другие последствия внешних воздействий, а также болезни кожи, нервной системы, уха и сосцевидного отростка [2].

Исследования отечественных и зарубежных ученых подтверждают воздействие факторов, формирующих вредные и опасные условия труда, на здоровье женщин в сельском хозяйстве. Рассматривалась, в частности, тяжелая работа, при которой сотрудницы каждый день поднимают тяжести более 10 кг. 2/3 таких женщин страдают от болей в позвоночнике (преимущественно в пояснице), шейном и грудном отделах. Это снижает качество жизни и провоцирует такие риски для здоровья, как переутомление и преждевременная менопауза [3]. Тяжелый женский труд — частая причина скелетно-мышечных заболеваний нижней части спины, плеч, коленей и особенно запястий [4]. Тяжелые условия и воздействие химических веществ оборачиваются проблемами репродуктивного здоровья [5, 6]. В постменопаузе у работниц агросектора широко распространены нарушения липидного обмена, что говорит о рисках сердечно-сосудистых заболеваний [7].

Рабочая среда в сельском хозяйстве провоцирует аллергические респираторные заболевания. Причины — органические вещества, твердые частицы биологического происхождения (органическая пыль) с плесенью и микроорганизмами. Такая взвесь может вызывать аллергические реакции, ринит, астму, экзогенный аллергический альвеолит, пневмонит [8], [9]. Виброакустические факторы производственной среды в сельском хозяйстве могут способствовать ухудшению слуха [10].

[6] *Главный внештатный специалист профпатолог. Планируемые результаты деятельности. Отчет главного внештатного специалиста профпатолога Минздрава России за 2019 год.* Министерство здравоохранения Российской Федерации. URL: https://minzdrav.gov.ru/vneshtatnye-spetsialisty/glavnyy-vneshtatnyy-spetsialist-38/plan-38 (дата обращения: 18.07.2023).

Судя по перечню возможных заболеваний, особенно сложная ситуация в животноводстве. Здесь женщины подвержены рискам заболеваний нервно-мышечного аппарата, периферической нервной системы, сердца и сосудов, органов пищеварения, движения, женской половой сферы. Условия свиноводческих предприятий могут провоцировать хронические тонзиллиты, миокардиопатии, связанные с очаговой инфекцией. У занятых в птицеводстве диагностируют заболевания верхних дыхательных путей и инфекции кожи. В растениеводстве работницы страдают вегетативно-сосудистыми расстройствами, гипертонией, заболеваниями периферической нервной системы. Под воздействием пестицидов развиваются хроническая коронарная недостаточность, болезни сердечной мышцы, желудочно-кишечного тракта, печени и желчевыводящих путей. Сильная запыленность обусловливает неспецифические болезни легких [11].

В результате расследований случаев профессиональной патологии установлены основные причины острых профессиональных и хронических профессиональных заболеваний (рис. 6).



Рис. 6. Причины профессиональных заболеваний, %: *а* — острых, *б* — хронических

Уточним, что в диаграммах на рис. 6 отражены только самые существенные, по мнению специалистов, причины недугов. В части (*а*) не учтены недоработки по использованию средств индивидуальной и коллективной защиты, аварийные ситуации, отсутствие своевременной первой помощи. В части (*б*) не учтены нарушения производственной санитарии и гигиены труда, недостаточно хорошие условия работы, слабая механизация и автоматизация.

Исследования условий труда и профессиональных заболеваний в сельском хозяйстве свидетельствуют о несоблюдении санитарных и других норм, установленных для охраны здоровья работников. Назовем некоторые нарушения:

– нет регулярного контроля факторов рабочей среды, трудовых процессов, производственных и санитарно-бытовых помещений;

– не соблюдаются правила организации рабочих мест, требования к оборудованию, сооружениям, транспорту;

– не проводятся предварительные и периодические медицинские осмотры работников, занятых во вредных и опасных производственных условиях [12].

Перечисленные ниже меры будут способствовать нормализации условий труда и профилактике профессиональных заболеваний работниц сельскохозяйственных предприятий:

– соблюдение законодательства в области охраны труда и здоровья женщин;

– достаточное финансирование мероприятий по охране труда;

– регулярные осмотры и планово-предупредительные ремонты, модернизация оборудования — источника вредных и опасных факторов;

– контроль технических процессов и технологической оснащенности рабочих мест;

– механизация и автоматизация производства;

– организация труда, адекватная характеру и объему выполняемых работ, технологическому процессу;

– соблюдение режима труда и отдыха в зависимости от тяжести и напряженности работы;

– ступенчатый производственный контроль условий труда, санитарно-эпидемиологического состояния и эргономики рабочих мест;

– учет типовых норм и специальной оценки условий труда для обеспечения сотрудников средствами коллективной защиты, индивидуальной защиты, специальной одеждой и обувью, а также контроль их использования;

– специальная оценка условий труда для снижения воздействия выявленных негативных факторов производственной среды и трудового процесса;

– внедрение современных цифровых средств для обучения, инструктажей по охране труда, оказанию первой помощи;

– своевременные медицинские осмотры и выполнение предписаний врачей;

– поддержание в рабочем состоянии оснащенных медицинских кабинетов, отделений психологической разгрузки, спортивных и рекреационных объектов;

– иммунизация и сезонная профилактика респираторных заболеваний;

– пропаганда здорового образа жизни.

Обсуждение и заключение. Многие занятые в сельском хозяйстве женщины работают в неудовлетворительных условиях. Около трети сотрудниц испытывают воздействие негативных факторов. Тяжесть и напряженность производственных процессов способствуют развитию профессиональных заболеваний. Для улучшения ситуации необходим госконтроль за состоянием условий труда и профессиональными заболеваниями. Следует разрабатывать и внедрять меры охраны труда и здоровья женщин, в том числе в сельском хозяйстве.

Список литературы

1. Садыков Р.М., Большакова Л.Н. Женское здоровье: состояние, причины ухудшения, меры по улучшению. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины.* 2022;30(2):247–252. https://doi.org/10.32687/0869-866x-2022-30-2-247-252

2. Бакиров А.Б., Шайхлисламова Э.Р., Гайнуллина М.К. и др. Особенности профессиональной заболеваемости работников сельского хозяйства Республики Башкортостан в современных условиях. *Медицина труда и экология человека.* 2015;(4):51–57.

3. Dorota Raczkiewicz, Tomasz Saran, Beata Sarecka-Hujar, Iwona Bojar Work conditions in agriculture as risk factors of spinal pain in postmenopausal women. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2019;25(2):250–256. https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1364903

4. Pinzke S. Comparison of Working Conditions and Prevalence of Musculoskeletal Symptoms among Dairy Farmers in Southern Sweden over a 25-Year Period. *Front Public Health*. 2016;19:4–98. https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00098

5. Derya Adıbelli, Nurcan Kırca, İlknur Özkan. The problems of women working in greenhouse agriculture in rural area in Turkey: A phenomenological study from health and social perspective. *Health & Social Care in the Community*. 2022;30(1):203–211. https://doi.org/10.1111/hsc.13393

6. Pons R., Boulanger M., Tual S., Busson A., Renier M., Perrier S., et al. Agriculture exposure and time to pregnancy among women enrolled in the French prospective cohort AGRICAN. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2021;63(5):432–440. https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002163

7. Krakowiak J., Raczkiewicz D., Wdowiak A., Cichońska D., Bojar I., et al. Atherogenic lipid profile and health behaviours in women post-menopause working in agriculture. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2019;26(4):585–591. https://doi.org/10.26444/aaem/105391

8. Di Stefano F., Di Giampaolo L., Verna N., Di Gioacchino M. Respiratory allergy in agriculture. *European Annals of Allergy and Clinical Immunology*. 2007;39(3):89–100.

9. Zejda J.E., Dosman J.A. Respiratory disorders in agriculture. *Tubercle and Lung Disease*. 1993;74(2):74–86. https://doi.org/10.1016/0962-8479(93)90031-R

10. Thaper R., Sesek R., Garnett R, Acosta-Sojo Y., Purdy G.T. The Combined Impact of Hand-Arm Vibration and Noise Exposure on Hearing Sensitivity of Agricultural/Forestry Workers-A Systematic Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023;20(5):4276. https://doi.org/10.3390/ijerph20054276

11. Спирин В.Ф., Новикова Т.А., Варшамов Л.А. Условия труда и профессиональная заболеваемость работников сельского хозяйства. *Медицина труда и промышленная экология.* 2007;(11):7–12. URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/usloviya-truda-i-professionalnaya-zabolevaemost-rabotnikov-selskogo-hozyaystva/viewer (дата обращения: 18.06.2023).

12. Чернышкова Е.В., Мухина М.Ю. Стратегии здоровьесбережения работников сельского хозяйства с профессиональными заболеваниями (по материалам фокус-группового исследования). *Саратовский научно-медицинский журнал.* 2017;13(1):88–92. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/strategii-zdoroviesberezheniya-rabotnikov-selskogo-hozyaystva-s-professionalnymi-zabolevaniyami-po-materialam-fokus-gruppovogo/viewer (дата обращения: 18.06.2023).

References

1. Sadykov RM, Bolshakova LN. The female health: status, causes of deterioration, measures of improvement. *Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine.* 2022;30(2):247–252. https://doi.org/10.32687/0869-866X-2022-30-2-247-252

2. Bakirov AB, Shaikhlislamova ER, Gainullina MK, Masyagutova LM, Khafizova AS, Churmantayeva SKh, et al. Specific features of occupational morbidity of Bashkortostan agricultural workers under modern conditions. *Occupational medicine and human ecology*. 2015;(4):51–57.

3. Dorota Raczkiewicz, Tomasz Saran, Beata Sarecka-Hujar, Iwona Bojar Work conditions in agriculture as risk factors of spinal pain in postmenopausal women. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2019;25(2):250–256. https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1364903

4. Pinzke S. Comparison of Working Conditions and Prevalence of Musculoskeletal Symptoms among Dairy Farmers in Southern Sweden over a 25-Year Period. *Front Public Health*. 2016;19:4–98. https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00098

5. Derya Adıbelli, Nurcan Kırca, İlknur Özkan. The problems of women working in greenhouse agriculture in rural area in Turkey: A phenomenological study from health and social perspective. *Health & Social Care in the Community*. 2022;30(1):203–211. https://doi.org/10.1111/hsc.13393

6. Pons R, Boulanger M, Tual S, Busson A, Renier M, Perrier S, et al. Agriculture exposure and time to pregnancy among women enrolled in the French prospective cohort AGRICAN. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2021;63(5):432–440. https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002163

7. Krakowiak J, Raczkiewicz D, Wdowiak A, Cichońska D, Bojar I, et al. Atherogenic lipid profile and health behaviours in women post-menopause working in agriculture. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2019;26(4):585–591. https://doi.org/10.26444/aaem/105391

8. Di Stefano F, Di Giampaolo L, Verna N, Di Gioacchino M. Respiratory allergy in agriculture. *European Annals of Allergy and Clinical Immunology*. 2007;39(3):89–100.

9. Zejda JE, Dosman JA. Respiratory disorders in agriculture. *Tubercle and Lung Disease*. 1993;74(2):74–86. https://doi.org/10.1016/0962-8479(93)90031-R

10. Thaper R, Sesek R, Garnett R, Acosta-Sojo Y, Purdy GT. The Combined Impact of Hand-Arm Vibration and Noise Exposure on Hearing Sensitivity of Agricultural/Forestry Workers-A Systematic Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023;20(5):4276. https://doi.org/10.3390/ijerph20054276

11. Spirin VF, Novikova TA, Varshamov LA. Work conditions and occupational morbidity among agricultural workers. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2007;(11):7–12. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/usloviya-truda-i-professionalnaya-zabolevaemost-rabotnikov-selskogo-hozyaystva/viewer (accessed: 18.06.2023).

12. Chernyshkova EM, Andriyanova EA, Yurova IYu, Chernyshkov DV, Mukhina MYu. Strategies of health preservation of agricultural workers with occupational diseases (material of focus-group research). *Saratov Journal of Medical Scientific Research*. 2017;13(1):88–92. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/strategii-zdoroviesberezheniya-rabotnikov-selskogo-hozyaystva-s-professionalnymi-zabolevaniyami-po-materialam-fokus-gruppovogo/viewer (accessed: 18.07.2023).6

Поступила в редакцию 28.06.2023
Поступила после рецензирования 16.07.2023
Принята к публикации 31.07.2023

Об авторе:

Валентина Юрьевна Контарева, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, механизации и автоматизации технологических процессов и производств Донского государственного аграрного университета (346493, РФ, Ростовская область, п. Персиановский, ул. Кривошлыкова д. 24), AuthorID, ORCID, valia_k@bk.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Received 28.06.2023
Revised 16.07.2023
Accepted 31.07.2023

About the Author:

Valentina Yu. Kostareva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Life Safety, Mechanization and Automation of Technological Processes and Productions Department, Don State Agrarian University (24, Krivoshlykova str., Persianovskii, Rostov region, 346493, RF), AuthorID, ORCID, valia_k@bk.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINE BUILDING





УДК 692.66:006.354 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-34-43

Оценка влияния внутренних факторов на показатели загруженности пассажирских лифтовых установок на основе результатов регулярного мониторинга

Г.Ш. Хазанович ✉, **Д.С. Апрышкин**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ hazanovich@mail.ru

Аннотация
Введение. Обеспечение высокой надежности и безопасности эксплуатации пассажирских лифтовых установок во многом определяется реализуемым режимом их технического обслуживания (ТО). Частота выполнения профилактических воздействий зависит прежде всего от уровня загруженности лифта, для оценки которого используются временны́е, силовые показатели и степень отработки ресурса. В качестве временны́х показателей приняты коэффициент чистого машинного времени (КМВ) и частота включений, которые являются случайными величинами, зависящими от ряда внутренних факторов, характеризующих условия эксплуатации установки. Целью данной работы является установление взаимосвязи средних значений КМВ, как одного из главных показателей загруженности лифтовой установки, и основных внутренних факторов.
Материалы и методы. Исследования выполнены на основе обработки и обобщения статистических материалов диспетчерского контроля временны́х показателей ряда пассажирских лифтовых установок. Случайным образом отобраны 11 лифтов в домах, отличающихся этажностью, количеством жильцов, пользующихся лифтом, и скоростью движения кабины. Для построения эмпирических зависимостей КМВ от числа жильцов, скорости кабины и этажности дома использованы графоаналитические методы. Наряду с техническими параметрами лифта учитывались случайные изменения показателей КМВ по времени суток.
***Результаты исследования*.** Установлены эмпирические зависимости КМВ от основных внутренних факторов — плотности заселения дома, этажности здания и скорости движения кабины. Математические модели обеспечивают получение результатов, адекватных экспериментальным значениям. Ошибка при сравнении расчетных данных с фактическими не превышала в большинстве случаев 10 %.
Обсуждение и заключение. Значения полученных эмпирических зависимостей дают возможность оценивать загруженность установок в текущий период эксплуатации без проведения дополнительных многодневных замеров. Эмпирические формулы можно использовать в качестве базовых соотношений при имитационном моделирования в произвольной стадии жизненного цикла.

Ключевые слова: лифт пассажирский, техническое состояние, показатели загруженности, периодичность технического обслуживания, коэффициент машинного времени

Благодарности: авторы выражают благодарность коллективу ОАО «ЛифтСервис» г. Ростова-на-Дону за предоставленные возможности использовать данные регулярных наблюдений за работой лифтовых установок.

Для цитирования. Хазанович Г.Ш., Апрышкин Д.С. Оценка влияния внутренних факторов на показатели загруженности пассажирских лифтовых установок на основе результатов регулярного мониторинга. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):34–43. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-34-43

Original article

Assessment of the Influence of Internal Factors on the Indicators of Passenger Elevator Units Utilization Based on the Results of Regular Monitoring

Grigorii Sh. Khazanovich ✉, **Dmitrii S. Apryshkin**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ hazanovich@mail.ru

Abstract

Introduction. Ensuring high reliability and safety of operation of passenger elevator units is largely determined by the implemented maintenance conditions (MC). The frequency of performing preventive actions depends, first of all, on the level of elevator utilization. Time, power indicators and the degree of remaining life are used to evaluate it. Among the time indicators, the net machine time coefficient (NMT) and the turn-on frequency are accepted, which are random variables depending on a number of internal factors characterizing the operating conditions of the unit. The work objective is to establish the relationship between the average values of NMT, as one of the main indicators of the load of the elevator unit, and the main internal factors.

Materials and Methods. The research was carried out on the basis of processing and generalization of statistical materials of dispatching control of time indicators of a number of passenger elevator units. 11 elevators were randomly selected, differing in the number of floors, the specific number of residents using the elevator, and the speed of movement of the cab. Graphical-analytic methods were used to construct empirical dependences of NMT on the number of residents, the speed of the cab and the number of floors of the building. Along with the technical parameters of the elevator, random changes in the NMT indicators for individual periods of the day were taken into account.

Results. Empirical dependences of the NMT on the main internal factors — the density of occupation, the number of floors of the building and the speed of the cab movement were established. Mathematical models provided results adequate to experimental values. The error when comparing the calculated data with the actual data did not exceed 10 % in most cases.

Discussion and Conclusion. The value of the empirical dependencies obtained consists in the ability to assess the workload of units during the current period of operation without additional multi-day measurements. Empirical formulas can be used as basic relations in simulation modeling at any stage of the life cycle.

Keywords: passenger elevator, technical condition, workload indicators, maintenance interval, machine time coefficient

Acknowledgements: the authors express their gratitude to the staff of Liftservice OAO in Rostov-on-Don for the opportunity to use the data on regular observations of the operation of elevator units.

For citation. Khazanovich GSh, Apryshkin DS. Assessment of the Influence of Internal Factors on the Indicators of Passenger Elevator Units Utilization Based on the Results of Regular Monitoring. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(3):34–43. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-34-43

Введение. Загруженность лифтовой установки в процессе эксплуатации зависит от ряда внутренних факторов, к которым относятся этажность здания, уровень заселенности дома, характеристики лифтовой установки и др. Уровень загруженности лифта оказывает непосредственное влияние на техническое состояние его узлов на протяжении всего срока эксплуатации установки. Одним из методов обеспечения необходимого технического состояния лифта является своевременное выполнение работ по техническому обслуживанию. Ряд исследователей предприняли попытку определить оптимальную периодичность технического обслуживания лифтов с учетом фактической нагруженности системы. В работе «О контроле технического состояния лифтовых канатов на основе технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения» А.В. Панфилов, А.Р. Юсупов, А.А. Короткий, Б.Ф. Иванов рассмотрели применение технологии искусственного интеллекта и компьютерного зрения для контроля технического состояния лифтовых канатов [1]. Исследователи из КНР и Нидерландов проанализировали научно обоснованный выбор стратегии и периодичности ТО [2–6]. Они пришли к выводу, что универсальной целевой функцией должны быть экономические показатели. Для обоснования такого решения приведено утверждение о том, что «техническое обслуживание и аварийные отказы тесно связаны с надежностью лифтового оборудования, но отличаются характером этой связи и экономическими последствиями. Повышение затрат на ТО приводит к сокращению аварийных отказов и к уменьшению затрат, связанных с ликвидацией, и убытков из-за простоев». Таким образом, с одной стороны, растут затраты на ТО, с другой — снижаются расходы на обеспечение надежности.

Поэтому в качестве целевой функции принимается некоторое универсальное соотношение, например, так называемые приведенные затраты, которое учитывает основные экономические составляющие.

Современные системы диспетчерского контроля позволяют проводить постоянный мониторинг состояния лифта, а также получать временны́е показатели работы его основных узлов: чистую продолжительность работы и частоту включений главного привода лифта[1,2]. На основе перечисленных временны́х показателей строится методика определения периодичности ТО. Временны́е показатели также можно отнести к эксплуатационным данным, на основе которых авторами статьи ранее проводилось исследование случаев отказов в работе пассажирских лифтов [7, 8].

Материалы и методы. Для оценки влияния внутренних факторов на показатели загруженности пассажирских лифтовых установок использованы результаты диспетчерских записей временны́х данных работы пассажирских лифтовых установок г. Ростова-на-Дону, а также гипотеза об относительной продолжительности машинного цикла, свидетельствующая о том, что коэффициент машинного времени работы лифтовой установки зависит от следующих основных факторов: этажность здания — N, количество жильцов в подъезде — Z, количество жильцов, пользующихся лифтом — Z_0, средняя скорость движения кабины — $v_{ср}$,м/с, грузоподъемность — R, чел., количество квартир в подъезде — $M_к$, количество квартир в подъезде, жильцы которых не пользуются лифтом — $M_{к1}$ [9].

Как показано в работе[3], среднее машинное время рейса (без учета остановок на вход и выход пассажиров) пропорционально количеству этажей здания. Эту зависимость приводит Д. С. Апрышкин в своей диссертации «Оценка технического состояния машин с канатной тягой на основе имитационного моделирования»[3].

В целях исследования авторами отобраны 11 лифтовых установок жилых домов г. Ростова-на-Дону (таблица 1). Предварительный анализ результатов компьютерных записей диспетчерского контроля показал, что значения КМВ существенно отличаются в дневное и ночное время [9].

Таблица 1

Исходные данные результатов компьютерного контроля КМВ и числа включений

№ лифта	Адрес дома и тип лифта / количество подъездов	N/R	$M_к$/ $M_{1к}$, кв.	Z, чел.	$v_{расч}$, м/с	Средний КМВ			Средняя частота включений в мин., ЧМВ		
						дневной	ночной	общий	дневная	ночная	общая
1	Орбитальная, 68/1	9/5	171/19	303	0,63	0,252	0,065	0,197	2,61	2,606	2,609
	Беляева, 22/2	9	212/20								
2	Пассажирский	9/5	106/10	144	0,63	0,119	0,036	0,095	2,361	2,380	2,366
3	Пассажирский	9/5	106/10	240	0,63	0,2	0,046	0,155	2,054	2,103	2,068
	Капустина, 14/3	9	144/12								
4	Пассажирский	9/5	36/4	72	0,67	0,077	0,017	0,060	3,807	4,282	3,945
5	Пассажирский	9/5	36/4	99	0,67	0,085	0,02	0,066	3,067	3,360	3,152
6	Пассажирский	9/5	36/4	111	0,67	0,055	0,015	0,043	3,162	4,320	3,500
	Космонавтов, 37/2	18	140/2								
7	Пассажирский	18/5	35/2	65	0,91	0,167	0,031	0,127	2,004	2,367	2,110
8	Грузовой	18/8	35/2	43	0,91	0,105	0,048	0,088	2,213	2,445	2,281
	Пановой, 30/1	24									
9	Пассажирский	24/5	108/0	310	1,35	0,234	0,038	0,177	2,265	2,164	2,236
10	Пассажирский	24/5	108/0	347	1,35	0,276	0,05	0,210	2,219	2,433	2,281
11	Грузовой	24/13	106/0	165	1,35	0,137	0,021	0,103	2,083	1,886	2,025

[1] *Диспетчерский комплекс «ОБЬ».* Руководство по эксплуатации РЭ 3434-001-49739805-07. URL: https://lkds.ru/upload/docs/pdf/general/RE_3434-001-49739805-07_5.pdf (дата обращения: 11.04.2023).

[2] *Система лифтового диспетчерского контроля и связи СЛДКС-1.* Руководство по эксплуатации. Ч. 1. Техническое описание ЕСАН.484457.001РЭ. URL: http://www.mnppsaturn.ru/ftp/public/doc/sldks/re%20sldks-1m%201.pdf (дата обращения: 11.04.2023).

[3] Апрышкин Д.С. *Оценка технического состояния машин с канатной тягой на основе имитационного моделирования.* Автореф. дис. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2023. 21 с. URL: https://www.dissercat.com/content/otsenka-tekhnicheskogo-sostoyaniya-mashin-s-kanatnoi-tyagoi-na-osnove-imitatsionnogo-modelir/read

Постоянные значения факторов: h=3 м — межэтажное расстояние; $N_н$=1 — число этажей, жильцы которых не пользуются лифтом.

На основе приведённых данных построены зависимости коэффициента машинного времени K_m от числа пассажиров, пользующихся лифтом, Z_0 (рис. 1).

Для лифтов в домах с числом этажей 9 и 24 КМВ статистически прямо пропорционален величине Z_0. Номера точек на графиках соответствуют данным таблицы 1.

Исключениями являются положения точек 4 и 6. Данные отклонения в экспериментальных зависимостях вполне допустимы с учетом формирования чистого машинного времени работы лифта как стохастического процесса под воздействием многих случайных факторов. Графики на рис. 1 отражают ориентировочное положение прямых $K_{mэ}$=f(Z_0), точное положение линий получено методом наименьших квадратов [10].

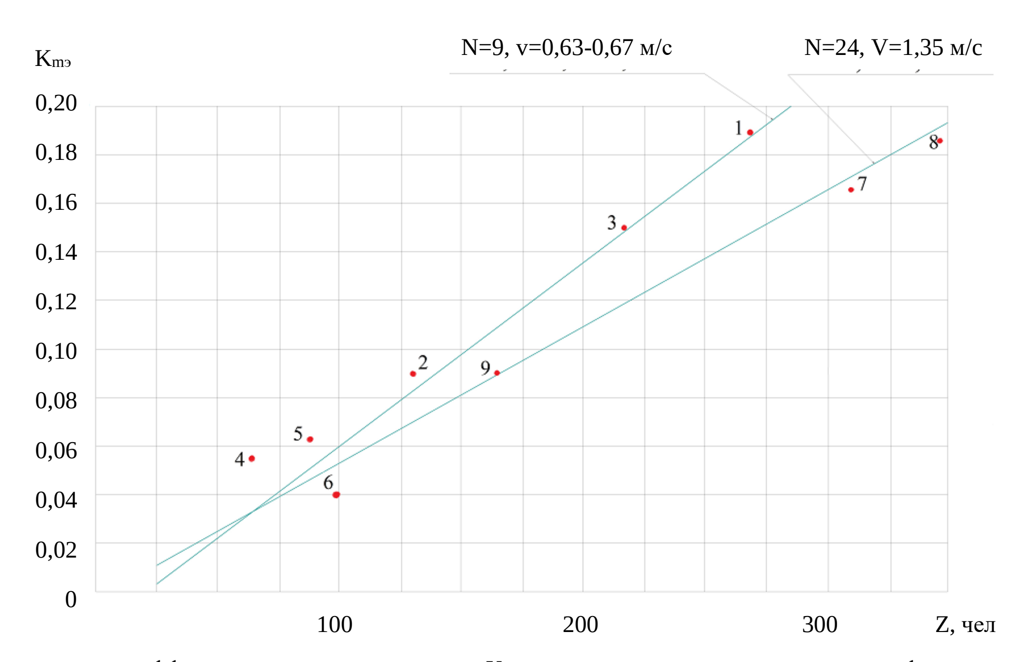


Рис. 1. Зависимости коэффициента машинного времени $K_{mэ}$ от числа жильцов, пользующихся лифтом, для среднесуточной обработки данных

На графиках рис. 1 отчетливо видно, что КМВ-$K_{mэ}$ линейно зависит от числа пассажиров, пользующихся лифтом, Z_0, а при увеличении скорости движения кабины, v, КМВ снижается.

При построении математической модели (1) среднего значения КМВ принята структура, состоящая из трех сомножителей: $\frac{\alpha_{m1}}{\lambda_н}$ — учитывает угол наклона прямой в зависимости от периода времени суток; $Z_i(1-\frac{M_{k1i}}{M_{ki}})$ — количество жильцов, пользующихся лифтом; $\Phi(\frac{v_{расч.i}}{v_{баз}})$ — функция изменения КМВ от соотношения скоростей лифта, принятого в качестве базового, $v_{баз}$, и лифта с конкретной скоростью, $v_{расч.i}$. В качестве базового принят лифт N=9 со средней скоростью, $v_{баз}$=0,65 м/с. При этом прямые K_{mi}=f(Z_i) проходят через начало координат:

$$K_{mi} = \frac{\alpha_{m1}}{\lambda_н} \cdot Z_i(1-\frac{M_{k1i}}{M_{ki}}) \cdot \Phi(\frac{v_{расч.i}}{v_{баз}}), \quad (1)$$

где i=1, 2, 3 и т. д. определяет номер прямой с фиксированным значением средней скорости движения кабины, $v_{расч.i}$, вдоль которой концентрируются значения K_{mi} в зависимости от числа жителей дома (подъезда), пользующихся лифтом:

i=1 — лифты со средней скоростью $v_{расч.1}$=0,63–0,65 м/с;

i=2 — лифты со средней скоростью $v_{расч.2}$=0,91 м/с;

i=3 — лифты со средней скоростью $v_{расч.3}$=1,35 м/с;

$\lambda_н$ — коэффициенты снижения КМВ в ночной период, определённые на основе обработки результатов мониторинга (таблица 1): для N=9 и v_1=0,63…0,67 м/с — $\lambda_{н1}$=3,0; для N=18 и v_2=0,91 м/с — $\lambda_{н2}$=3,5; для N=24 и v_3=1,35м/с — $\lambda_{н3}$=4,0; для дневного режима: N=9, v_1=0,63 и 0,67 м/с — $\lambda_{н1}$= 0,773; N=18, v_2=0,91 м/с — $\lambda_{н2}$=0,721; N=24, v_3=1,35 м/с — $\lambda_{н3}$=0,669.

α_{m1} — угловой коэффициент базовой зависимости $K_{m1}=\alpha_{m1} \cdot Z_0$; для крайней правой точки базовой линейной зависимости при Z=303 чел., Z_0=269 чел., K_{m1}=0,197 получим (см. первую строчку табл. 1):

$$\alpha_{m1} = \frac{0,197}{269} = 0,00073 \ (\frac{ед.ЧМВ}{чел.}).$$

$\Phi(\frac{v_{расч.i}}{v_{баз}})$ — линейная функция, учитывающая влияние соотношения наименьшей скорости, $v_1=v_{баз}=0{,}65$ м/с, к реальной скорости лифта, $v_{расч.2}=0{,}91$, $v_{расч.3}=1{,}35$ и др.

Установим вид функции $\Phi(\frac{v_{расч.i}}{v_{баз}})$, используя данные таблицы 2. Функция должна пройти через точки α_{m1}, α_{m2} и α_{m3}. Числовые характеристики для этих точек приведены в таблице 2.

Таблица 2

Числовые характеристики точек α_{m1}, α_{m2} и α_{m3}

Точки	1	2	3
v, м/с	0,65	0,91	1,35
$K_{m.max}$	0,197	0,192	0,186
$Z_{0.max}$	269	300	347
α_{mi}	0,00073	0,00064	0,00054

Уравнение прямой, проходящей через две точки, 1 и 3.

Обозначим $\alpha_{mi} = y$; $\frac{v_i}{v} = x$. Координаты точек 1–x_1=1; y_1=1;
3–x_3=1,35/0,65=2,08; y_3=0,00054/0,00073=0,762. Уравнение прямой:

$$\frac{x-1}{2{,}08-1} = \frac{y-1}{0{,}762-1};$$

после простых преобразований получаем y=1,22–0,22x.

Тогда $\Phi\left(\frac{v_{расч.i}}{v_{баз}}\right) = 1{,}22 - 0{,}22\,\frac{v_{расч.i}}{v_{баз}}$. Уравнение (1) принимает вид

$$K_{mi} = \frac{\alpha_{m1}}{\lambda_н} \cdot Z_i\left(1 - \frac{M_{k1i}}{M_k}\right) \cdot \left(1{,}22 - 0{,}22\,\frac{v_{расч.i}}{v_{баз}}\right). \quad (2)$$

Результаты исследования. Оценка достоверности результатов расчетов по формуле (2), $K_{mрасч.}$, в сравнении с данными диспетчерских записей, $K_{m.э.}$, приведена в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение результатов расчетов и данных диспетчерских записей

№	i	$V_{расч.i}$, м/с	Z_i, чел.	M_{k1i}, чел.	M_{ki}, чел.	$K_{m.расч.}$	$K_{m.э.}$
1	1	0,65	240	106	10	0,152	0,150
3	1	0,65	99	36	4	0,062	0,063
4	2	0,91	130	35	4	0,094	0,120
5	2	0,91	143	35	4	0,081	0,080
6	3	1,35	310	108	0	0,166	0,166
7	3	1,35	165	108	0	0,089	0,090

Как видно по выражению (2), в явном виде этажность дома N в формулу не входит. Косвенно влияние N проявляется через Z_0. Влияние Z_0 (50...300 чел.) и $v_{расч}$ (0,6…2,0 м/с) приведено на рис. 2. Как следует из этих зависимостей, при увеличении средней скорости движения лифта, $v_{расч.i}$, практически пропорционально снижается КМВ. С увеличением заселенности дома КМВ пропорционально увеличивается.

Таким образом, в широком диапазоне влияющих факторов математическая модель (2) обеспечивает получение результатов, адекватных экспериментальным значениям (отклонение экспериментальных данных в сравнении с расчетными не превышает в большинстве случаев 10 %) и позволяет прогнозировать величину КМВ при изменении важнейших факторов — плотности заселения дома или подъезда и скорости движения кабины, от которых в значительной мере зависит нагруженность лифтового оборудования.

Вместе с тем, соотношение (2) учитывает влияние на КМВ только двух факторов: Z_0, и $v_{ср}$. Величина N непосредственно в формулу не входит, что ограничивает ее применение и снижает наглядность при практическом использовании. Эта формула обобщает только совокупность данных регулярных наблюдений, ограниченных таблицей 1.

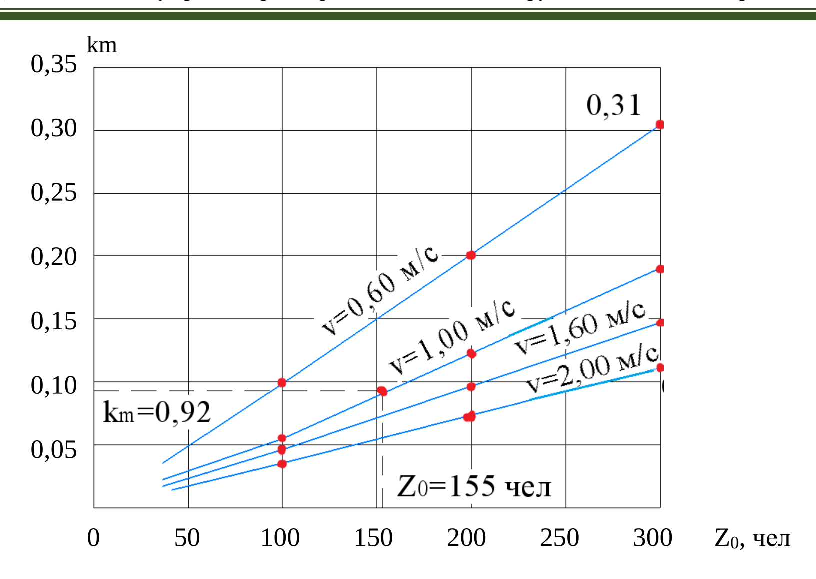


Рис. 2. Расчетные зависимости КМВ от числа жильцов дома (подъезда), Z_0, пользующихся лифтом, и средней скорости движения кабины

Воспользуемся другим подходом для вывода общего соотношения K_m=f(N, $v_{ср}$, Z_0). Проведенными ранее исследованиями[3] доказано, что среднее значение КМВ пропорционально Z_0, причем коэффициенты пропорциональности для домов различной этажности существенно различаются. Так, для лифтов N=9 и $v_{ср}$=0,63 м/с коэффициент, характеризующий отношение приращения КМВ Δ_{Km} к приращению числа жильцов, пользующихся лифтом Δ_{Z0}, составляет $\frac{\Delta_{Km}}{\Delta_{Z0}} = 0{,}075\,\frac{\text{ед.}K_m}{100\text{ чел}}$, для лифтов N=24 и $v_{ср}$=1,35 м/с — $\frac{\Delta_{Km}}{\Delta_{Z0}} = 0{,}055\,\frac{\text{ед.}K_m}{100\text{ чел}}$.

Эти данные свидетельствуют о зависимости удельного КМВ–$\frac{\Delta_{Km}}{\Delta_{Z0}}$ (т. е. приходящегося на одного списочного жильца, пользующегося лифтом) от двух основных факторов — этажности дома N и средней скорости движения кабины $v_{ср}$.

С увеличением этажности среднее количество пролетов, проходящих лифтом за один цикл, увеличивается прямо пропорционально числу этажей. При неизменном числе циклов в единицу времени для обеспечения необходимой пропускной способности лифта машинное время цикла с ростом этажности будет пропорционально расти. С увеличением средней скорости продолжительность рейса и машинное время пропорционально снижаются.

Если обозначить коэффициент влияния перечисленных факторов N и $v_{ср}$ на удельный КМВ α_{Km}, то в первом приближении зависимость α_{Km}=f(N,$v_{ср}$) будет иметь вид:

$$\alpha_{Km}=\alpha_{Km0}+\frac{K_1\cdot N}{K_2+v}, \qquad (3)$$

где $\alpha_{Km0}=0{,}0004\,\frac{\text{ед.}K_m}{100\text{чел}}$ — минимальное значение удельного КМВ, зафиксированное в результате обработки данных диспетчерского наблюдения.

Используя экспериментальные данные и приведенные логические рассуждения, получим обобщенную зависимость удельного КМВ от N и $v_{ср}$:

$$\alpha_{Km}=0{,}0004+\frac{0{,}00228N}{v_{ср}-0{,}358}. \qquad (4)$$

Размерность величины $[\alpha_{Km}]=\frac{\text{ед.}K_m}{100\text{ чел}}$. В выражении (4) удельный КМВ пропорционален числу этажей дома и обратно пропорционален средней скорости кабины. Обоснование структуры формулы (4) произведено согласно рекомендациям [10, 11], подбор постоянных K_1 и K_2 выполнен по методике [12, 13].

Зависимости α_{Km}=f(N, $v_{ср}$) в графической форме в диапазонах переменных N=(9…24), v=(0,6…2,0 м/с) приведены на рис. 3.

Покажем на примере для лифта, не входящего в число объектов регулярных наблюдений, вычисление КМВ с использованием выражения (4). Исходные данные: N=16; $v_{ср}$=1 м/с; Z_0=250 (2,5x100) чел.

Результаты вычислений:

$$\alpha_{Km}=0{,}0004+\frac{0{,}0228N}{v_{ср}-0{,}358}=0{,}0004+\frac{0{,}00228\cdot 16}{1-0{,}358}=0{,}0569\,\frac{\text{ед.}K_m}{100\text{ чел}}.$$

Расчетный КМВ работы лифтовой установки:

$$K_m=0{,}0569\cdot 2{,}5=0{,}142.$$

Формула (4) справедлива при N=9…24, $v_{ср}$=0,6…2,0 м/с, при произвольном числе жильцов Z_0 и позволяет определить предварительное значение КМВ при оценке нагруженности режима эксплуатации лифта.

Следует отметить, что строгих закономерностей для другого важнейшего показателя (удельного числа включений в единицу чистого машинного времени — ЧМВ, $n_{ср}$) установить не удалось. Отметим, что связь между K_m и n не прослеживается (таблица 4 и рис. 4).

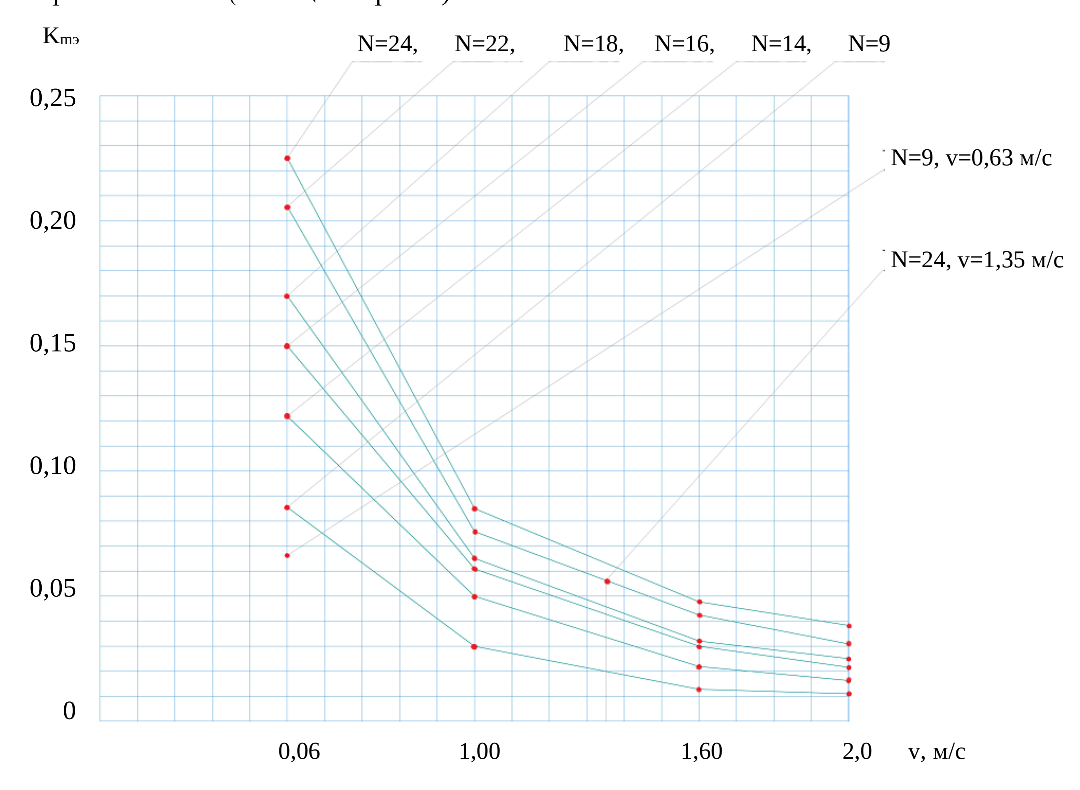


Рис. 3. Зависимость удельного КМВ от этажности дома и скорости лифта

Таблица 4

Средние значения показателей режимов работы лифтов

№ лифтов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
КМВ	0,190	0,089	0,149	0,056	0,063	0,040	0,145	0,065	0,088	0,107	0,080
n, 1/мин. ЧМВ	2,45	2,13	1,90	3,43	2,75	2,86	1,95	1,83	3,08	2,25	1,89

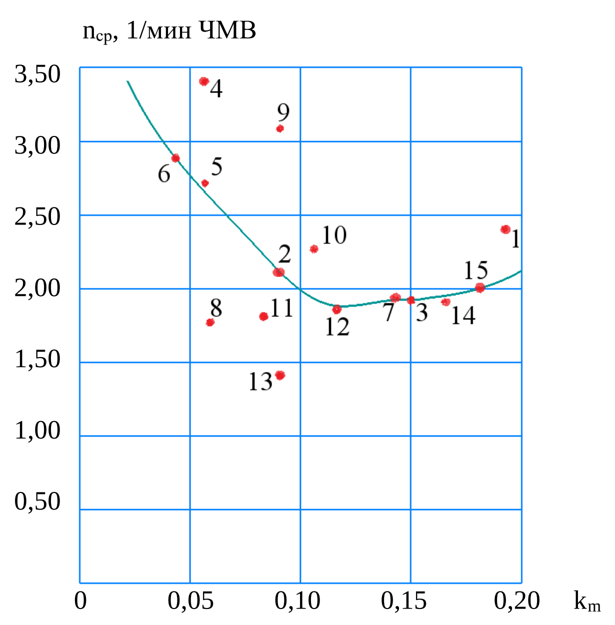


Рис. 4. Взаимосвязь случайных значений $n_{ср.}$ и $K_{mср.}$

Результаты обработки данных ежедневного мониторинга работы лифтовых установок с различными характеристиками в отличающихся по типам жилых многоэтажных зданиях, а также однотипных или идентичных лифтовых установок в одном многоподъездном строении представлены в таблице 4. Основные показатели режима работы главного привода (ГП) лифта изменяются в широких пределах: КМВ — в пять раз, от 0,04 до 0,19, количество включений в минуту ЧМВ — в 1,87 раза, от 1,83 до 3,43. КМВ объективно характеризует чистое время нахождения всех элементов лифта в рабочем состоянии, значения этого коэффициента для большинства установок находятся на низком уровне (0,05…0,2). Это свидетельствует о существенной недогрузке главного привода и других узлов. Удельное количество включений определяет частоту приложения динамических нагрузок на привод, канаты, конструкцию кабины и другие узлы. Характерное значение числа включений — от двух до трех в минуту ЧМВ, в пересчете на часовую частоту включений это составит 120…180 включений, что вполне допустимо для используемых двигателя, редукторов и тормозных устройств.

Обсуждение и заключение. При проектировании и реализации систем технического обслуживания пассажирских лифтовых установок необходимо прежде всего определять уровень нагруженности их основных силовых элементов — двигателя, редуктора, канатоведущего шкива, канатов и др. [14]. Среди важнейших показателей степени загрузки системы следует учитывать КМВ и частоту включений. Наиболее надежным способом прогнозирования перечисленных показателей является статистическая обработка данных диспетчерского контроля за работой лифтов. Представленные эмпирические зависимости коэффициента машинного времени от этажности домов, числа жильцов, пользующихся лифтом, и скорости движения кабины также являются базовыми при имитационном моделировании временны́х показателей работы лифтовых установок, вводимых в эксплуатацию, а также лифтов, которые не снабжены системой диспетчерского контроля.

Список литературы

1. Панфилов А.В., Юсупов А.Р., Короткий А.А. и др. О контроле технического состояния лифтовых канатов на основе технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2022;22(4):323–330. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-323-330

2. Jae-Hak Lim, Dong Ho Park. Optimal Periodic Preventive Maintenance Schedules with Improvement Factors Depending on Number of Preventive Maintenances. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*. 2007;24(1):111–124. https://doi.org/10.1142/S0217595907001139

3. Hongjiu Liu, Jiaxuan Wu. Research on Preventive Maintenance Strategy of Elevator Equipment. *Open Journal of Social Sciences.* 2018;06(01):165–174. https://doi.org/10.4236/jss.2018.61012

4. Li Y.H., Liu Z. Maintenance Interval Optimization Method Based on Improvement Factor for System Components. *Mechanical Engineering & Automation*. 2016;4:6–8.

5. Gia-Shie Liu. Three M-Failure Group Maintenance Models for M/M/N Unreliable Queuing Service Systems. *Computers & Industrial Engineering*. 2012;62(4):1011–1024. https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.028

6. Almgren T., Patriksson M., Wojciechowsri A. Optimization Models for Improving Periodic Maintenance Schedules by Utilizing Opportunities. In: *Proceedings of the 4th Production and Operations Management World Conference.* The Netherlands, Amsterdam; 2012.

7. Хазанович Г.Ш., Апрышкин Д.С. Современные системы контроля состояния лифтовых установок. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2019;(2):37–40. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-37-40

8. Шпет Н.А, Муравьев О.П. Исследование отказов пассажирских лифтов по данным эксплуатации. *Известия Томского политехнического университета.* 2013;323(4):123–126. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/5035

9. Хазанович Г.Ш., Апрышкин Д.С. Оценка нагруженности силовых элементов пассажирского лифта по результатам регулярного мониторинга. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2020;(1):32–42. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-32-42

10. Губанов В.С. *Обобщенный метод наименьших квадратов.* Монография. Санкт-Петербург: Наука; 1997. 318 с. URL: http://pzs.dstu.dp.ua/DataMining/mls/bibl/gubanov.pdf (дата обращения: 12.06.2023)

11. Вентцель Е.С. *Теория вероятностей.* Учебник для вузов. Москва: Высшая школа; 1999. 576 с.

12. Гнеденко Б.В. *Курс теории вероятностей.* Учебник. Москва: Либроком; 2011. 448 с.

13. Гмурман В.Е. *Теория вероятностей и математическая статистика.* Учебник для вузов. Москва: Высшая школа; 2003. 479 с.

14. Подберезина С.Г. Лифтовое хозяйство: организуем систему планово-предупредительного ремонта. *Промышленная безопасность*. 2020;3:73–84. https://www.profiz.ru/pb/3_2020/lift_remont/

References

1. Panfilov AV, Yusupov AR, Korotkiy AA, Ivanov BF. On the Control of the Technical Condition of Elevator Ropes Based on Artificial Intelligence and Computer Vision Technology. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2022;22(4):323–330. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-323-330

2. Jae-Hak Lim, Dong Ho Park. Optimal Periodic Preventive Maintenance Schedules with Improvement Factors Depending on Number of Preventive Maintenances. *Asia-Pacific Journal of Operational Research.* 2007;24(1):111–124. https://doi.org/10.1142/S0217595907001139

3. Hongjiu Liu, Jiaxuan Wu. Research on Preventive Maintenance Strategy of Elevator Equipment. *Open Journal of Social Sciences.* 2018;06(01):165–174. https://doi.org/10.4236/jss.2018.61012

4. Li YH, Liu Z. Maintenance Interval Optimization Method Based on Improvement Factor for System Components. *Mechanical Engineering & Automation.* 2016;4:6–8.

5. Gia-Shie Liu. Three M-Failure Group Maintenance Models for M/M/N Unreliable Queuing Service Systems. *Computers & Industrial Engineering*. 2012;62(4):1011–1024. https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.028

6. Almgren T, Patriksson M, Wojciechowsri A. Optimization Models for Improving Periodic Maintenance Schedules by Utilizing Opportunities. In: *Proceedings of the 4th Production and Operations Management World Conference.* The Netherlands, Amsterdam; 2012.

7. Khazanovich GS, Apryshkin DS. Modern condition monitoring systems of elevator units. Safety of Technogenic and Natural Systems. 2019;(2):37–40. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-37-40

8. Shpet NA, Muravlev OP. Investigation of passenger lift failure by the operation data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University.* 2013;323(4):123–126. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/5035

9. Khazanovich GS, Apryshkin DS. Assessment of load of load-bearing elements of the passenger elevator based on regular monitoring results. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;1:32–42. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-32-42

10. Gubanov VS. *Obobshchennyi metod naimen'shikh kvadratov*. Monograph. Saint-Petersburg: Nauka; 1997. 318 p. URL: http://pzs.dstu.dp.ua/DataMining/mls/bibl/gubanov.pdf (accessed: 12.06.2023)

11. Venttsel ES. *Teoriya veroyatnostei*. Textbook for universities. Moscow: Vysshaya shkola; 1999. 576 p.

12. Gnedenko BV. *Kurs teorii veroyatnostei.* Textbook. Moscow: Librokom; 2011. 448 p.

13. Gmurman VE. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika.* Textbook for universities. Moscow: Vysshaya shkola; 2003. 479 p.

14. Podberezina SG. Liftovoe khozyaistvo: organizuem sistemu planovo-predupreditel'nogo remonta. *Promyshlennaya bezopasnost'.* 2020;3:73–84. https://www.profiz.ru/pb/3_2020/lift_remont/

Поступила в редакцию 03.07.2023
Поступила после рецензирования 24.07.2023
Принята к публикации 24.07.2023

Об авторах:

Хазанович Григорий Шнеерович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник центра научных компетенций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), AuthorID, ORCID, hazanovich@mail.ru

Апрышкин Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), AuthorID, ORCID, aprechnik@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Г.Ш. Хазанович — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, оценка достоверности результатов, корректировка выводов.

Д.С. Апрышкин — вывод аналитических соотношений, подготовка текста, анализ результатов исследований, формирование выводов, проведение расчетов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 03.07.2023
Revised 24.07.2023
Accepted 24.07.2023

About the Authors:

Grigorii Sh. Khazanovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Center for Scientific Competencies, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), AuthorID, ORCID, hazanovich@mail.ru

Dmitrii S. Apryshkin, Senior lecturer of the Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), AuthorID, ORCID, aprechnik@mail.ru

Claimed contributorship:

GSh Khazanovich: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study; revision of the text; evaluation of the reliability of the results; correction of conclusions.

DS Apryshkin: derivation of analytical relations; preparation of the text; research results analysis; drawing conclusions; carrying out calculations.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINE BUILDING





УДК 620.179 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54

Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций

Н.Л. Вернези 
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉vernezin@mail.ru

Аннотация

Введение. Для оценки состояния металла конструкции чаще всего применяют неразрушающие методы. Опасное напряжение определяется по значению предела текучести. У такого подхода есть слабые места. Это, во-первых, вероятностная природа методики (в нормативно-техническую документацию вносится минимальное значение показателя, полученное при лабораторных испытаниях). Во-вторых, следует преодолеть ограничения по числу образцов. В-третьих, разная длительность эксплуатации обусловливает значительную разницу механических характеристик металла, что в известной степени осложняет долгосрочное прогнозирование состояния конструкции. Представленная работа призвана решить эти задачи в рамках исследования новых и давно эксплуатируемых объектов в Ростовской области. Цель научных изысканий — анализ усталостных изменений и определение возможной деградации металла.

Материалы и методы. Механические характеристики исследуемого материала достоверно описываются законом распределения Вейбулла через параметр сдвига (минимально возможное значение характеристики) и параметр формы (рассеивание величины). Для научных изысканий в рамках работы задействовали метод индентирования, основанный на видоизмененном способе оценки твердости по Роквеллу. Конический индентор внедряется в поверхность, затем анализируется реакция металла. Для реализации метода воспользовались аналогово-цифровым преобразователем и ноутбуком. Для корреляционного анализа брали промежуточные характеристики: глубина, максимальная и минимальная скорости, максимальное и минимальное ускорение внедрения конуса. Устанавливалась корреляция с механическими характеристиками, определенными по стандартным испытаниям на растяжение и твердость металла.

Результаты исследования. Изучались объекты с нулевой и многолетней эксплуатацией. Замеры проводили на складе, производстве, стадионе, мосту, во Дворце спорта и на опоре линии электропередач. Из группы новых и отработавших сооружений выбрали по одному для подробной фиксации значений пределов текучести. Так, до начала эксплуатации проанализировали состояние трех металлических ферм склада. Установлено, что наименьше значение предела текучести здесь — 240 МПа, максимальное — 345 МПа. На опорах линии электропередач, бывших в эксплуатации 43 года, самое низкое зафиксированное значение предела текучести — 235 МПа, самое высокое — 384 МПа. Для каждого из шести сооружений приводится минимальное и среднее распределение значений предела текучести металла, даны коэффициенты вариации этого показателя. Зафиксированные значения обобщены в виде таблицы. Рассчитаны средние показатели по всем новым и отработавшим конструкциями. Графически представленные данные иллюстрируют рост коэффициентов вариации предела текучести с увеличением срока эксплуатации.

Обсуждение и заключение. Сравнительный анализ полученных значений предела текучести строительных конструкций приблизительно одного класса прочности позволяет предположить, что влияние времени эксплуатации может как увеличить, так и уменьшить исследуемый показатель. При этом длительная эксплуатация — фактор, увеличивающий среднее значение коэффициента вариации. Для мониторинга прочностных возможностей конструкции целесообразно задействовать неразрушающий метод, выборочно отслеживая механические характеристики элементов до и в процессе эксплуатации

Ключевые слова: неразрушающий контроль, предел текучести металла, металл эксплуатируемой конструкции, деградация металла

Благодарности: автор выражает глубокую признательность Алексею Николаевичу Бескопыльному и Андрею Анатольевичу Веремеенко за помощь в обследовании металлоконструкций.

Для цитирования. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):44–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54

Original article

Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures

Nikas L. Vernezi ✉
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉vernezin@mail.ru

Abstract

Introduction. Non-destructive methods are most often used to assess the condition of the metal structure. Dangerous stress is determined by the value of the yield strength. This approach has weaknesses. This is, firstly, the probabilistic nature of the methodology (the minimum value of the indicator obtained during laboratory tests is entered into the regulatory and technical documentation). Secondly, the limitations on the number of samples should be overcome. Thirdly, the different duration of operation causes a significant difference in the mechanical characteristics of the metal, which to a certain extent complicates the long-term prediction of the condition of the structure. The presented work is designed to solve these problems within the framework of the study of new and long-operated facilities in the Rostov region. The scientific research objective is to analyze fatigue changes and determine possible degradation of the metal.

Materials and Methods. The mechanical characteristics of the material under study were reliably described by the Weibull distribution law through the shear parameter (the minimum possible value of the characteristic) and the shape parameter (magnitude dispersion). For scientific research, the indentation method based on a modified Rockwell hardness estimation method was used as part of the work. A conical indenter was embedded in the surface, then the reaction of the metal was analyzed. To implement the method, an analog-to-digital converter and a laptop were used. For correlation analysis, intermediate characteristics were taken: depth, maximum and minimum velocities, maximum and minimum acceleration of cone insertion. A correlation was established with the mechanical characteristics determined by standard tensile and hardness tests of the metal.

Results. Objects with zero and long-term operation were studied. The measurements were carried out in a warehouse, production site, stadium, bridge, Palace of Sports and on a power line support. From the group of new and used structures, one was selected for a detailed fixation of the values of yield strength. So, before the start of operation, the condition of three metal trusses of the warehouse was analyzed. It was established that the lowest value of the yield strength here was 240 MPa, the maximum was 345 MPa. On the power transmission line poles, which have been in operation for 43 years, the lowest recorded value of the yield strength was 235 MPa, the highest was 384 MPa. For each of the six structures, the minimum and average distribution of the metal yield strength values was given, and the coefficients of variation of this indicator were given. The recorded values were summarized in the form of a table. The average values for all new and used designs were calculated. Graphically presented data illustrate the growth of the coefficients of variation of the yield strength with increasing service life.

Discussion and Conclusion. A comparative analysis of the obtained values of the yield strength of building structures of approximately the same strength class suggests that the influence of operating time can both increase and decrease the studied indicator. At the same time, long-term operation is a factor that increases the average value of the coefficient of variation. To monitor the strength capabilities of the structure, it is advisable to use a non-destructive method, selectively monitoring the mechanical characteristics of the elements before and during operation.

Keywords: non-destructive testing, metal yield strength, metal of the structure in operation, metal degradation

Acknowledgements: the author would like to express his deep appreciation and gratitude to Aleksey Nikolaevich Beskopylny and Andrey Anatolyevich Veremeenko, who took part in the inspection of metal structures together with the author.

For citation. Vernezi NL. Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(3):44–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54

Введение. При диагностике, восстановлении, оценке надежности или реконструкции долго эксплуатируемых стальных сооружений возникает необходимость выяснить механические характеристики металла, в том числе показатели его напряжения. Для пластичных материалов, к которым относятся стали металлоконструкций, опасное напряжение определяется по значению предела текучести. Как известно, он имеет вероятностную природу, в нормативно-техническую документацию вносится его минимальное значение, полученное при лабораторных испытаниях ограниченного числа образцов. В большинстве случаев состояние металла конструкции оценивается с помощью неразрушающего контроля.

В процессе эксплуатации механические характеристики (в частности, предел текучести) претерпевают определенные изменения [1]. В исследовании дается сравнительный анализ значений предела текучести металла одного класса прочности в конструкциях до эксплуатации и отработавших десятки лет. Значения предела текучести получены при обследовании неразрушающим методом индентирования.

Во многих источниках описаны изменения металла в процессе эксплуатации конструкции. При этом нет единой точки зрения относительно направления таких трансформаций. Многое зависит от природы материала и длительности эксплуатации. Так, в атомной энергетике металл конструкций почти не меняется за 30–40 лет эксплуатации [2]. В [3] отмечается снижение почти на 40 % циклической прочности сталей 20 и 45 после 15-летнего хранения. Авторы работы [4] подчеркивают, что 40 и более лет эксплуатации магистрального газопровода почти не сказываются на механических характеристиках стали. Вместе с тем в [5] фиксируется снижение пластичности при неизменном значении предела прочности металла газопровода после 37 лет эксплуатации. В [6] указывается на опасность отказов газопровода при длительной эксплуатации из-за деградационных процессов в металле. В [7] описано снижение ударной вязкости после длительной эксплуатации.

Для стали 17Г1С в первые годы эксплуатации газопровода отмечается повышение прочности со снижением пластичности, а в период от 20 до 30 лет эксплуатации наблюдается устойчивое снижение как прочности, так и пластичности [8]. Очевидно, при существенных различиях сроков эксплуатации можно ожидать значительной разницы механических характеристик металла, что осложняет долгосрочное прогнозирование состояния конструкции. Подход, предложенный в данной статье, призван преодолеть это и названные выше ограничения: вероятностную природу показателя и недостаточное число образцов.

Обследованы несколько объектов в Ростовской области с нулевой и многолетней эксплуатацией. В результате собраны и обобщены новые данные по пределу текучести реальных металлоконструкций. Цели представленной научной работы — проанализировать изменения и оценить возможную деградацию металла.

Материалы и методы. Итак, попытаемся дать количественную оценку изменений механических характеристик металла. Для этого рассмотрим одни и те же элементы конструкции до и после длительной эксплуатации. Такой мониторинг периодически проводится применительно к металлу магистральных трубопроводов. При этом можно даже прогнозировать остаточную долговечность материала [9, 10]. Однако для других металлоконструкций сложно реализовать такой подход. В этом случае можно воспользоваться информацией, полученной методом неразрушающего контроля металла. Обеспечение корректности таких данных предполагает, что:

– сопоставляются однотипные конструкции;
– контролируемые элементы сделаны из металла одного класса прочности;
– выборка обрабатываемых данных достаточно репрезентативна.

Авторы [11] утверждают, что класс прочности сталей для металлоконструкций определяется некоторыми интервалами пределов текучести, прочности и относительного удлинения. Значит, следует сравнивать металлы с механическими характеристиками, укладывающимися в эти интервалы. Например, для стали класса прочности С-285 предел текучести допускается в границах от 265 МПа до 285 МПа, т. е. определяется с погрешностью 7,55 %

Для диагностики действующих конструкций подходят только неразрушающие методы. Например, акустическую эмиссию задействуют для:

– нахождения дефектов в металле [12];
– контроля напряженного состояния [13];
– выявления роста усталостной трещины [14] в сосудах под давлением;
– определения начала активного растрескивания металла [15];
– контроля сварных соединений [16, 17].

При этом решаются вопросы оптимального расположения приборов для определения дефектов в конструкциях сложной формы [18].

С помощью электромагнитного контроля фиксируется заданная твердость металла [19]. Кроме того, применяются методы прямого механического взаимодействия с металлом при индентировании для оценки:

– остаточных напряжений в металле [20];

– начального значения предела текучести [21].

Механические характеристики достоверно описываются трехпараметрическим законом распределения Вейбулла[1]:

$$F(X) = 1 - exp\,[-\,((X - C)/A)^B],$$

где X — величина механического свойства; C — параметр сдвига, определяющий минимально возможное значение характеристики; B — параметр формы, по которому можно судить о рассеивании этого свойства.

Очевидно, что в результате воздействия эксплуатационных нагрузок у материала могут изменяться средние, минимальные значения C механических характеристик. Как следствие, меняются среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации значений механических характеристик.

Примененный в статье метод индентирования основан на видоизмененном способе оценки твердости по Роквеллу. Конический индентор ударно (не статически) внедряется в отшлифованную испытуемую поверхность при условиях:

– энергия 0,16 Дж;

– угол при вершине 90º.

Затем анализируется реакция металла. Для работы достаточно 10 кв. см свободной площади металла [22–24] или сварного соединения [25]. Для реализации метода использовали аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и ноутбук. С помощью АЦП получили зависимости изменения скорости от времени внедрения конического индентора механической части. Затем сигнал программно обработали в ноутбуке и получили зависимости перемещения и ускорения индентора от времени. Далее взяли полученные из графиков промежуточные характеристики: глубина, максимальная и минимальная скорости, максимальное и минимальное ускорение внедрения конуса. Они стали объектом корреляционного анализа. Устанавливалась корреляция с механическими характеристиками, определенными по стандартным испытаниям на растяжение и твердость металла. В итоге изучения металлов различных классов прочности получили и зафиксировали универсальные корреляционные зависимости стандартных механических характеристик от промежуточных. Теперь при индентировании металла его стандартные механические характеристики в исследуемой точке почти сразу отображаются на дисплее ноутбука. Приборное обеспечение дает суммарное рассеивание, вызванное разбросом свойств в металле и погрешностью измерения. Предельные значения погрешности одного измерения — ±4 %. Возможность оперативно получить 10–20 значений на локальном участке металла нивелирует эту погрешность. А при оперативном получении неограниченного числа измерений обеспечивается высокая репрезентативность выборки. Перед каждым обследованием прибор тарируется:

– измеряется предел текучести на образцах с заранее известными свойствами, полученными при стандартных испытаниях на растяжение на разрывной машине ИР-200;

– затем выполняется регулировка.

Результаты исследования. Цель исследования заключалась в получении количественной сравнительной оценки возможной деградации металла в ходе длительной эксплуатации. Для этого неразрушающим методом индентирования фиксировались значения предела текучести стальных конструкций с нулевым и длительным сроком эксплуатации.

Так, рассматривались новые сооружения:

– складское помещение на ул. Луговой, 8 в Ростове-на-Дону (таблица 1);

– производственный корпус по ул. 1-й Пятилетки, 71 в Батайске (рис. 1);

– колонны трибун стадиона «Торпедо» в Таганроге (рис. 2).

Таблица 1

Данные обследования металлоконструкций склада на Луговой, 8 в Ростове-на-Дону

Значения предела текучести, МПа										
Ферма 12				Ферма 15				Ферма 18		
240	265	279	298	236	263	277	305	244	270	287
240	266	280	298	237	263	277	307	244	270	287
241	266	280	298	237	263	277	307	244	270	288

[1] ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649.2008). *Национальный стандарт Российской Федерации. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200146523 (дата обращения: 19.06.2023).

Значения предела текучести, МПа										
Ферма 12				Ферма 15				Ферма 18		
241	266	280	299	237	264	277	309	248	271	289
242	267	281	299	237	264	277	309	249	272	289
243	267	281	299	237	265	277	312	249	272	289
243	268	281	300	237	265	278	313	249	273	290
244	269	282	302	239	266	278	315	249	273	290
245	269	282	303	239	266	278	317	250	273	291
247	269	282	303	241	266	278	325	252	273	292
248	270	283	304	243	266	278	329	252	273	293
248	270	283	304	243	267	279	332	253	274	294
250	271	284	306	243	267	280	339	253	274	295
250	271	284	307	245	267	280	345	254	274	295
250	271	284	307	246	268	280	351	256	274	296
251	272	284	307	247	268	281		256	275	297
251	272	285	308	247	268	281		257	275	297
251	273	285	309	249	269	282		257	275	298
251	273	286	309	250	269	282		257	277	299
253	274	286	309	250	269	283		257	277	299
253	274	287	312	252	269	284		257	277	299
254	274	287	313	252	270	284		258	277	300
254	274	288	313	252	271	284		259	278	300
254	274	288	313	252	271	285		259	278	300
255	274	289	314	253	271	285		259	278	301
255	275	289	314	253	272	285		260	279	301
256	275	290	315	255	272	286		260	279	306
256	275	290	315	256	272	286		263	279	311
257	275	290	316	256	273	287		263	280	312
258	276	291	317	256	273	287		263	281	313
258	276	291	317	256	273	287		264	282	315
258	277	291	318	256	273	288		264	282	316
258	277	291	319	257	273	289		264	282	317
258	277	291	320	257	274	289		265	283	318
258	277	291	320	258	274	289		265	283	318
259	277	292	320	259	274	290		265	284	320
260	277	292	327	259	275	290		266	284	324
260	278	293	339	259	275	291		266	284	324
260	278	293	343	260	275	293		266	284	326
261	278	294	343	260	275	295		266	284	326
261	278	294	346	260	275	295		266	285	331
262	278	295	347	260	275	297		267	285	333
262	278	295	350	261	276	297		267	285	340
262	278	296	352	261	276	300		268	285	345
264	278	296	353	262	276	301		269	286	345
264	279	296	353	262	276	302		269	286	
264	279	297		262	276	302		270	286	

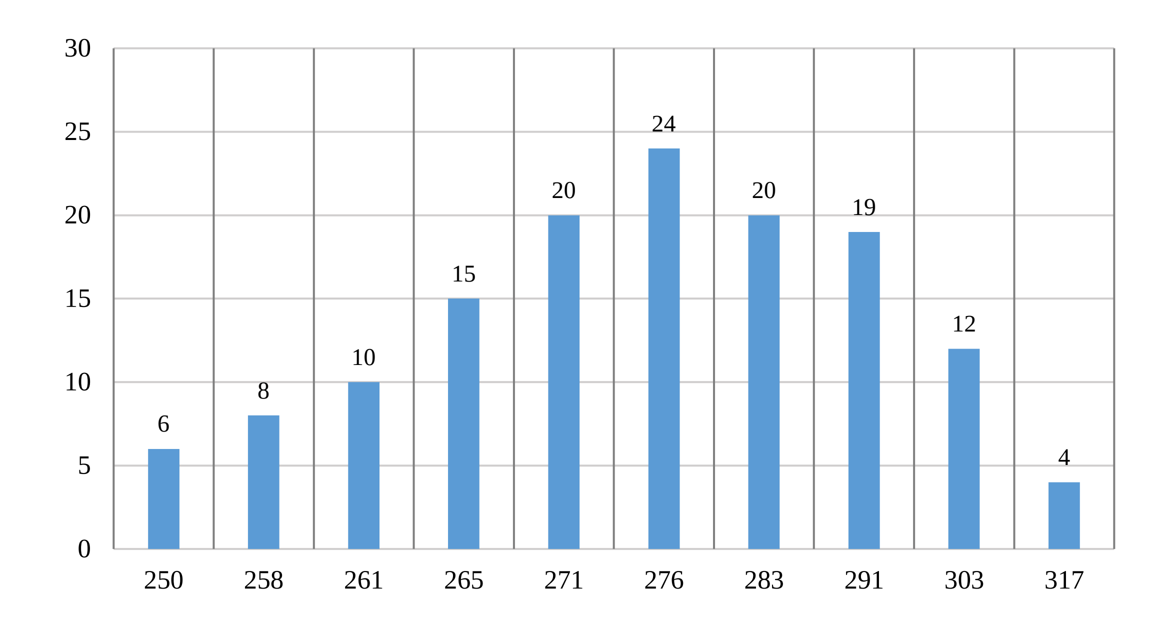


Рис. 1. Распределение значений предела текучести металла конструкций производственного корпуса в Батайске: σTmin = 246 МПа, σTср = 277 МПа, CV = 0,054

Здесь и далее указаны выборочные минимальные σт min, выборочные средние σт ср и коэффициенты вариации предела текучести CV. Ордината — шкала частоты значений. Цифры над столбцами — количество измеряемых значений в конкретном интервале.

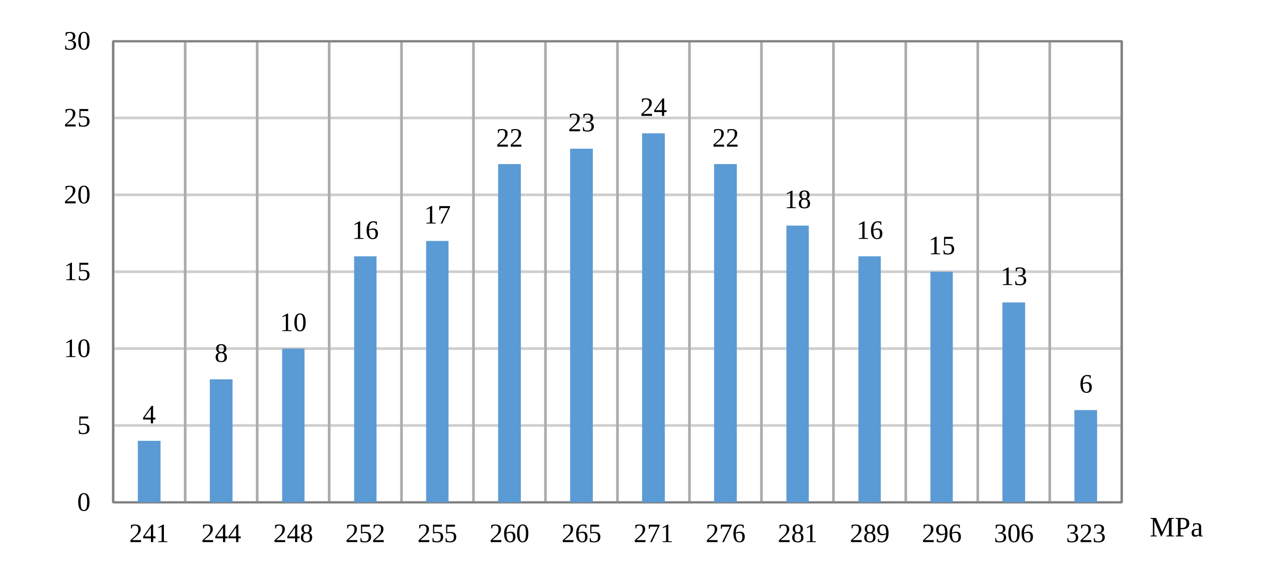


Рис. 2. Распределение значений предела текучести металла колонн стадиона «Торпедо» в Таганроге: σTmin = 240 МПа, σTср = 272 Мпа, CV = 0,068

Металл, бывший в эксплуатации несколько десятков лет, изучали по следующим объектам:

– железнодорожный мост на станции Лихая (65 лет, рис. 3);

– фермы покрытия Дворца спорта в Ростове-на-Дону (39 лет, рис. 4);

– растяжки несущих конструкций опор линии электропередач ВЛ 330 «Новочеркасская ГРЭС — Южная» (43 года, таблица 2).

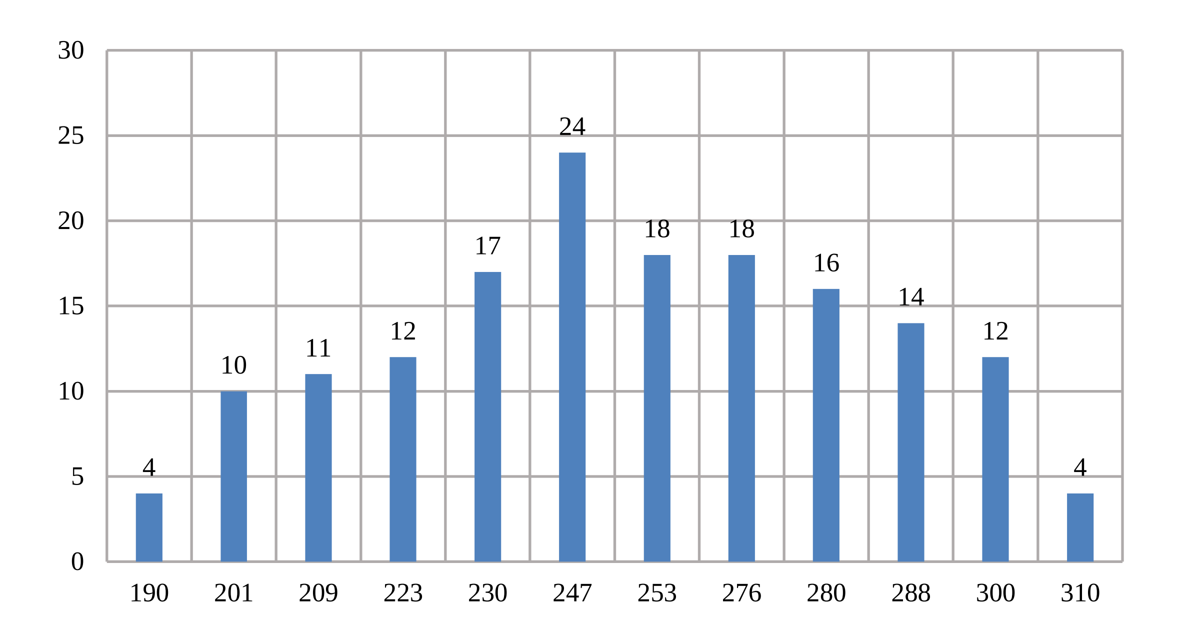


Рис. 3. Распределение значений предела текучести металла конструкций моста на ст. Лихая: σТmin = 188, σТср = 257, CV = 0,127

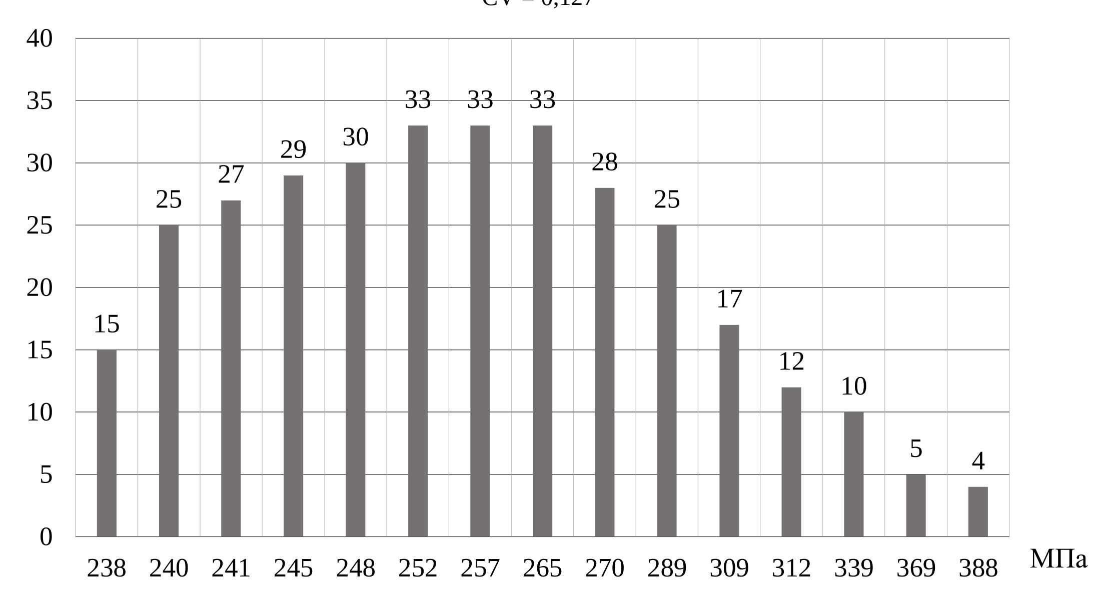


Рис. 4. Распределение значений предела текучести металла ферм покрытия Дворца спорта в Ростове-на-Дону: σТmin = 238 МПа, σТср = 263 МПа, CV = 0,11

Таблица 2

Результаты обследования растяжек опор ЛЭП ВЛ 330

Значения предела текучести, МПа							
235	244	249	259	275	282	288	357
236	245	251	261	278	282	291	357
237	246	255	263	280	282	292	366
238	246	256	265	280	283	294	380
239	247	256	269	281	284	295	380
239	248	259	272	282	286	303	384

Данные табл. 2 проверялись на соответствие трехпараметрическому закону распределения Вейбулла. Требовалось оценить теоретическое, а не выборочное минимальное значение предела текучести σт min. В результате расчета теоретическое оказалось меньше выборочного на 6 Мпа (229).

Отметим, что элементы новых конструкций не подвергались влиянию напряженно-деформированного состояния, а бывшие в эксплуатации длительное время находились в состоянии:

– сжато-изгибаемом (верхние пояса ферм покрытия);

– растянуто-изгибаемом (нижние пояса ферм покрытия);

– растянутом (растяжки).

Полученные в результате неразрушающего контроля значения предела текучести для лучшей информативности в таблице 2 и 3 ранжированы по возрастанию.

Стали всех новых металлоконструкций и ВЛ 330 можно отнести к классу прочности С285. У металла моста на станции Лихая среднее значение предела текучести на 8 МПа ниже указанной в [10] границы. У стали конструкций Дворца спорта — выше на 11 МПа.

Результаты сравнительного анализа приводятся в таблице 3 и на рис. 5.

Таблица 3

Сводные результаты исследований

Объект	Параметры					
	Значения предела текучести металла, МПа				Расчет среднего коэффициента вариации	
	Среднее $\sigma_{т}$		Минимальное в выборке $\sigma_{Т min}$	Среднее $\sigma_{Т min}$ по объектам	Среднеквадратичное отклонение (МПа) / CV	Среднее значение по объектам
Склад	276		236		23,7 / 0,085	
Производственный корпус	277	274	246	239	14,5 / 0,054	0,069
Стадион	272		240		18,5 / 0,068	
Дворец спорта	263		256		28,8 / 0,11	
ЛЭП ВЛ 330	280	267	235	226	39,8 / 0,142	0,123
Ж.-д. мост	257		188		33,5 / 0 ,127	

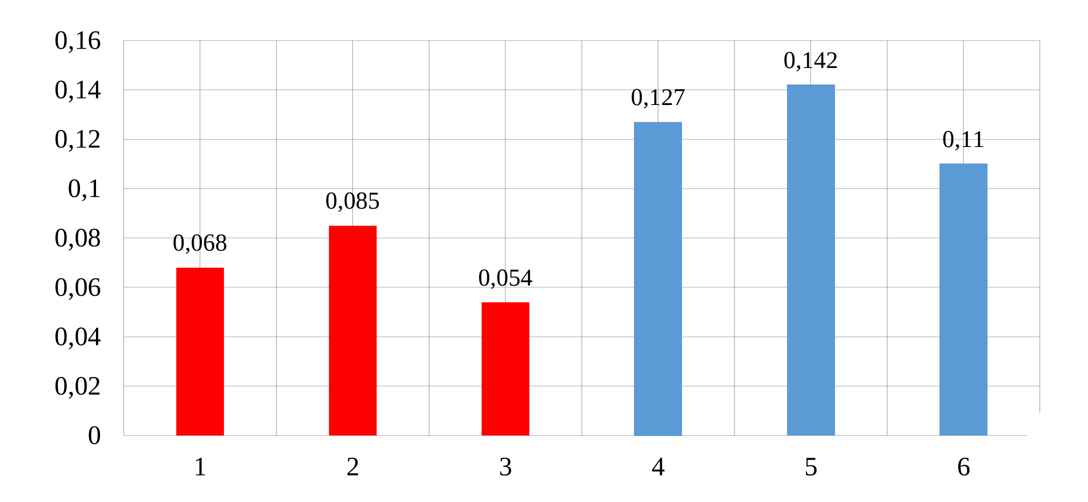


Рис. 5. Коэффициенты вариации предела текучести до и после длительной эксплуатации:
1 — стадион, 2 — склад, 3 — производственный корпус, 4 — ж.-д. мост, 5 — ЛЭП ВЛ 330,
6 — Дворец спорта

Обсуждение и заключение. Итак, сравним средние значения коэффициента вариации новых и бывших в эксплуатации конструкций. Из табл. 3 видно, что что после длительной эксплуатации этот показатель будет в среднем выше в 1,78 (во столько раз 0,123 больше, чем 0,069). Максимальный коэффициент вариации предела текучести (0,142) выявили на растяжках опор линии электропередач ВЛ 330 (43 года работы). Минимальное значение предела текучести (188 МПа) — у металла моста на ст. Лихая, бывшего в эксплуатации 65 лет.

Возможные теоретические минимальные значения предела текучести снижаются относительно выборочных, что может также увеличивать размах распределения и, соответственно, коэффициент вариации.

Для мониторинга прочностных возможностей (например, с целью ремонта или реконструкции) рекомендуется выборочно контролировать неразрушающим методом механические характеристики элементов металлоконструкции до и в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Доценко Е.Р, Мындюк В.Д., Карпаш М.О. и др. Оценка изменений механических свойств металла магистральных трубопроводов с использованием методов неразрушающего контроля. В: *Труды VII междунар. науч.-тех. конф. по надежности и безопасности магистрального трубопроводного транспорта.* Новополоцк: ПГУ; 2011. С. 143–145. URL: https://www.psu.by/images/stories/nauka/tezis_7mntk.pdf (дата обращения: 28.05.2023).

2. Горынин И.В, Тимофеев Б.Т. Деградация свойств конструкционных материалов при длительном воздействии эксплуатационных температур. *Вопросы материаловедения.* 2011;(1(65)):41–59. URL: http://www.crism-prometey.ru/science/editions/Russian1(65)2011.pdf (дата обращения: 28.05.2023).

3. Демина Ю. *Влияние длительной эксплуатации и хранения на механические свойства и механизмы разрушения конструкционных материалов.* Автореф. дис. канд. тех. наук. Москва; 2014. 26 с.

4. Лубенский С.А., Ямников С.А. Влияние длительности эксплуатации на свойства металла труб магистральных трубопроводов. *Проблемы анализа риска.* 2013;10(1):58–63.

5. Быков И.Ю., Бирилло И.Н., Кузьбожев П.А. Исследование характеристик механических свойств металла труб газораспределительной станции после продолжительной эксплуатации. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2015;(2):86–91. https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-2-86-91

6. Большаков А.М. Анализ разрушения и дефектов в магистральных газопроводах и резервуарах Севера. *Газовая промышленность.* 2010;(5(646)):52–53.

7. Сыромятникова А.С. Деградация свойств металла труб при длительной эксплуатации в условиях низких климатических температур в составе магистральных газопроводов. *Вестник Томского государственного университета.* 2013;18(4-2):1746–1747.

8. Никифорчин Г.Н., Цирульник О.Т., Звирко О.И. и др. Оценка деградации физико-механических свойств сталей длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2013;79(9):48–55.

9. Aneesh Bangia, Raghu V. Prakash. Energy Parameter Correlation of Failure Life Data between Cyclic Ball Indentation and Low Cycle Fatigue. *Open Journal of Metal*. 2012;2(1):31–36. https://doi.org//10.4236/ojmetal.2012.21005

10. Collin M., Parenteau T., Mauvoisin G., Pilvin P. Material Parameters Identification Using Experimental Continuous Spherical Indentation for Cyclic Hardening. *Computational Materials Science*. 2009;46(2):333–338. https://doi.org//10.1016/j.commatsci.2009.03.016

11. Горев В.В., Уваров Б.Ю, Филиппов В.В. и др. *Металлические конструкции.* В 3 т. Т. 1. *Элементы стальных конструкций*. Москва: Высшая школа; 1997. 527 с.

12. Pullin R., Holford K.M., Lark R., Eaton M.J. Acoustic emission monitoring of bridge structures in the field and laboratory. *Journal of Acoustic Emission*. 2008;26:172–181.

13. Anastasopoulos A.A., Kourousis D.A., Cole P.T. Acoustic emission inspection of spherical metallic pressure vessels. In: *The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008)*. Iran, Tehran; 2008. 10 p. URL: http://www.ndt.net/article/tindt2008/papers/177.pdf (дата обращения: 28.05.2023).

14. Pollock A. Probability of detection for acoustic emission. *Journal of acoustic emission*. 2007;25:231–237.

15. Polyzos D., Papacharalampopoulos A., Shiotani T., Aggelis D.G. Dependence of AE Parameters on the Propagation Distance. *Journal of acoustic emission*. 2011;29:57–67.

16. Gongtian Shen, Zhanwen Wu. Study on Spectrum of Acoustic Emission Signals of Bridge Crane. *Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010;52(3):144–148. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_08.pdf

17. Dirk Aljets, Alex Chong, Wilcox S.J., et al. Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array. *Journal of acoustic emission*. 2010;28:85–98.

18. Pullin R., Baxter M., Eaton M., Holford K.M., Evans S. Novel acoustic emission source location. *Journal of acoustic emission*. 2007;25:215–223.

19. Wilson J.W., Liu Jun, Karimian N., Davis C.L., Peyton A.J. Assessment of microstructural changes in Grade 91 power station tubes through permeability and magnetic Barkhausen noise measurements. In: *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*. Czech Republic, Prague; 2014. URL:

https://research.manchester.ac.uk/en/publications/assessment-of-microstructural-changes-in-grade-91-power-station-t (дата обращения: 28.05.2023).

20. Hongping Jin, Wenyu Yang, Lin Yan. Determination of residual stresses and material properties by an energy-based method using artificial neural networks. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2012;61(4):296–305. https://doi.org//10.3176/proc.2012.4.04

21. Clausnera A., Richterb F. Fundamental limitations at the determination of initial yield stress using nano-indentation with spherical tips. *European Journal of Mechanics*. 2016;58:69–75. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.01.009

22. Беленький Д.М., Недбайло А.А. *Способ определения механических характеристик и физического критерия подобия прочности материала детали.* Патент РФ, № 2279657. 2006. 12 с. URL: http://allpatents.ru/patent/2279657.html (дата обращения: 28.05.2023).

23. Бескопыльный А.Н, Веремеенко А.А., Вернези Н.Л. *Программа для ЭВМ № 2015610650 Вектор 2015*. Свидетельство РФ о государственной регистрации, № 2014661747. 2015. URL: https://onlinepatent.ru/software/2015610650/ (дата обращения: 28.05.2023).

24. Вернези Н.Л., Веремеенко А.А., Вальдман Д.С. Исследование прочностных характеристик металлического крепежа деревянного корпуса речного причала. *Инженерный вестник Дона*. 2015;(3). URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3231(дата обращения: 28.05.2023).

25. Belen'kii D.M., Vernezi N.L., Cherpakov A.V. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. *Welding International*. 2004;18(3):213–215. https://doi.org/10.1533/wint.2004.3268

References

1. Dotsenko ER, Myndyuk VD, Karpash MO. Otsenka izmenenii mekhanicheskikh svoistv metalla magistral'nykh truboprovodov s ispol'zovaniem metodov nerazrushayushchego kontrolya. In: *Trudy VII mezhdunar. nauch.-tekh. konf. po nadezhnosti i bezopasnosti magistral'nogo truboprovodnogo transporta.* Novopolotsk: 2011. P. 143–145. URL: https://www.psu.by/images/stories/nauka/tezis_7mntk.pdf

2. Gorynin IV, Timofeev BT. Degradation of properties of structural materials at long time influence of operational temperatures. *Voprosy Materialovedeniya.* 2011; (1(65)):41–59.

3. Demina Yu. *Vliyanie dlitel'noi ekspluatatsii i khraneniya na mekhanicheskie svoistva i mekhanizmy razrusheniya konstruktsionnykh materialov*. Avtoref. dis. kand. tekh. nauk. Moscow; 2014. 26 p.

4. Lubenskii SA, Yamnikov SA. Vliyanie dlitel'nosti ekspluatatsii na svoistva metalla trub magistral'nykh truboprovodov. *Issues of risk analysis.* 2013;10(1):58–63.

5. Bykov IYu, Birillo IN, Kuzbozhev PA. Study of characteristics of mechanical properties of gas-distributing station pipes metal after long-term operation. *Oil and Gas Studies.* 2015;(2):86–91. https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-2-86-91

6. Bolshakov AM. Analiz razrusheniya i defektov v magistral'nykh gazoprovodakh i rezervuarakh Severa. *Gas Industry*. 2010;(5(646)):52–53.

7. Syromyatnikova AS. Degradation of physical and mechanical condition of gas pipeline metal during long operation at low climatic temperatures. *Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences*. 2013;18(4-2):1746–1747.

8. Nikiforchin GN, Tsirul'nik OT, Zvirko OI, Gredil' MI, Voloshin VA. Degradation of the physical and mechanical properties of steels in long-run gas pipelines. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2013;79(9):48–55.

9. Aneesh Bangia, Raghu V Prakash. Energy Parameter Correlation of Failure Life Data between Cyclic Ball Indentation and Low Cycle Fatigue. *Open Journal of Metal*. 2012;2(1):31–36. https://doi.org//10.4236/ojmetal.2012.21005

10. Collin M, Parenteau T, Mauvoisin G, Pilvin P. Material Parameters Identification Using Experimental Continuous Spherical Indentation for Cyclic Hardening. *Computational Materials Science*. 2009;46(2):333–338. https://doi.org//10.1016/j.commatsci.2009.03.016

11. Gorev VV, Uvarov BYu, Filippov VV, Belyi GI, Endzhievskii LV, Krylov II, et al. *Metallicheskie konstruktsii.* In 3 vol. Vol. 1. *Elementy stal'nykh konstruktsii*. Moscow: Vysshaya shkola; 1997. 527 p.

12. Pullin R, Holford KM, Lark R, Eaton MJ. Acoustic emission monitoring of bridge structures in the field and laboratory. *Journal of Acoustic Emission*. 2008;26:172–181.

13. Anastasopoulos AA, Kourousis DA, Cole PT. Acoustic emission inspection of spherical metallic pressure vessels. In: *The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008)*. Iran, Tehran; 2008. 10 p. URL: http://www.ndt.net/article/tindt2008/papers/177.pdf (дата обращения: 28.05.2023).

14. Pollock, A. Probability of detection for acoustic emission. *Journal of acoustic emission*. 2007;25:231–237.

15. Polyzos D, Papacharalampopoulos A, Shiotani T, Aggelis DG. Dependence of AE Parameters on the Propagation Distance. *Journal of acoustic emission*. 2011;29:57–67.

16. Gongtian Shen, Zhanwen Wu. Study on Spectrum of Acoustic Emission Signals of Bridge Crane. *Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010;52(3):144–148. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_08.pdf

17. Dirk Aljets, Alex Chong, Wilcox SJ, et al. Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array. *Journal of acoustic emission*. 2010;28:85–98.

18. Pullin R, Baxter M, Eaton M, Holford KM, Evans S. Novel acoustic emission source location. *Journal of acoustic emission*. 2007;25:215–223.

19. Wilson JW, Liu Jun, Karimian N, Davis CL, Peyton AJ. Assessment of microstructural changes in Grade 91 power station tubes through permeability and magnetic Barkhausen noise measurements. In: *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*. Czech Republic, Prague; 2014. URL: https://research.manchester.ac.uk/en/publications/assessment-of-microstructural-changes-in-grade-91-power-station-t

20. Hongping Jin, Wenyu Yang, Lin Yan. Determination of residual stresses and material properties by an energy-based method using artificial neural networks. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2012;61(4):296–305. https://doi.org//10.3176/proc.2012.4.04

21. Clausnera A, Richterb F. Fundamental limitations at the determination of initial yield stress using nano-indentation with spherical tips. *European Journal of Mechanics*. 2016;58:69–75. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.01.009

22. Belenkii DM, Nedbailo AA. *Sposob opredeleniya mekhanicheskikh kharakteristik i fizicheskogo kriteriya podobiya prochnosti materiala detali.* Patent RF, No. 2279657. 2006. 12 p. URL: http://allpatents.ru/patent/2279657.html

23. Beskopylnyi AN, Veremeenko AA, Vernezi NL. *Programma dlya EVM № 2015610650 Vektor 2015*. Certificate of the Russian Federation on state registration, No. 2014661747. 2015. URL: https://onlinepatent.ru/software/2015610650/

24. Vernezi NL, Veremeenko AA, Valdman DS. Research of strength characteristics of metal fixture of the wooden case of the river mooring. *Engineering journal of Don*. 2015;(3). URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3231

25. Belen'kii DM, Vernezi NL, Cherpakov AV. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. *Welding International*. 2004;18(3):213–215. https://doi.org/10.1533/wint.2004.3268

Поступила в редакцию 26.06.2023
Поступила после рецензирования 13.07.2023
Принята к публикации 17.07.2023

Об авторе:

Вернези Никос Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), AuthorID, ORCID, vernezin@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Received 26.06.2023
Revised 13.07.2023
Accepted 17.07.2023

About the Author:

Nikas L. Vernezi, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), AuthorID, ORCID, vernezin@mail.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY





УДК 621. 762.1 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-55-65

Развитие межчастичного сращивания при спекании металлических порошков с добавлением углерода

М.С. Егоров ✉, **Р.В. Егорова**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉aquavdonsk@mail.ru

Аннотация

Введение. В публикациях о спеченных деталях из металлических порошков рассматриваются межчастичное сращивание в горячедеформированных материалах и особенности низколегированных конструкционных сталей, а также применение углеродосодержащих материалов. Авторы представленной статьи ранее исследовали спекание во взаимосвязи со структурными изменениями материала, описывали изменение физических и механических свойств, восстановление оксидов, рекристаллизацию и т. д. В данной работе показана связь механических свойств порошковых сталей с параметрами внутрикристаллитного сращивания. Кинетика его развития во время спекания демонстрируется впервые. Цель исследования — выяснить, как спекание влияет на межчастичное сращивание и структуру порошковых сплавов с железом и углеродом. Задача — изучить технологические режимы спекания образцов из легированного и чистого железного порошка для достижения наилучших механических характеристик.

Материалы и методы. Порошки фирмы «Хёганес» (Höganäs) спекали при температуре 900–1150 °C в течение 0,5–2,5 часов. Защитная газовая среда (диссоциированный аммиак) позволяла предотвратить окислительные и другие реакции спекания. Для статического холодного прессования задействовали гидравлический пресс 2ПГ-125 с максимальным усилием 1250 кН.

Результаты исследования. Впервые экспериментально установлено наличие разных по интенсивности механизмов внутрикристаллитного сращивания при спекании. Построены зависимости приращения относительной площади контактной поверхности от длительности изотермической выдержки. С ростом температуры спекания до 1150 ºC и времени выдержки более 80 мин площадь контактной поверхности постепенно увеличивается. Показано, что у образцов из рассматриваемых марок порошка при 1150 ºC формируется внутрикристаллитное сращивание на всей контактной поверхности. Следовательно, данную технологию можно рекомендовать для практического использования. Добавление в шихту графита замедляет рост контактной поверхности. При этом формовки из чистого порошка ABC100.30 и из порошка Distaloy HP-1 демонстрируют различия. В первом случае с добавлением в шихту графита контактная поверхность развивается интенсивнее, чем во втором. Полученные результаты зафиксированы на фото и визуализированы в виде графиков.

Обсуждение и заключение. По результатам механических испытаний можно оценить долю контактного сечения формовки с внутрикристаллитным сращиванием. Его признак — структурное соответствие межчастичной поверхности сращивания и межзеренной границы. Значение этой границы определяется при сопоставлении относительной площади контактного сечения с внутрикристаллитным сращиванием и относительной площадью контактной поверхности. Определены возможности повышения качества сращивания порошковых сталей за счет увеличения температуры и времени их выдержки при спекании

Ключевые слова: металлические порошки, межчастичное сращивание, порошковые горячедеформированные материалы, внутрикристаллитное сращивание, межчастичная поверхность, межзеренная граница

Благодарности: авторы выражают благодарность инженерам кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Ю. П. Пустовойту, В. И. Поправко за помощь в подготовке образцов и настройке измерительного оборудования, а также д.т.н., профессору Жанне Владимировне Еремеевой за научные консультации по выбору методик экспериментов.

Для цитирования. Егоров М.С., Егорова Р.В. Развитие межчастичного сращивания при спекании металлических порошков с добавлением углерода. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(3):55–65. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-8-3-55-65

Original article

Development of Interparticle Bonding during Sintering of Metal Powders with the Addition of Carbon

Maksim S. Egorov, Rimma V. Egorova
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉aquavdonsk@mail.ru

Abstract
Introduction. Publications on sintered metal powder parts consider interparticle bonding in hot-deformed materials and features of low-alloy structural steels, as well as the use of carbon-containing materials. The authors of the presented article have previously investigated sintering in relation to structural changes in the material, described changes in physical and mechanical properties, reduction of oxides, recrystallization, etc. This paper shows the relationship of mechanical properties of powder steels with the parameters of intracrystalline bonding. The kinetics of its development during sintering is demonstrated for the first time. The study objective is to find out how sintering affects the interparticle bonding and structure of powder alloys with iron and carbon. The task is to study the technological modes of sintering samples from alloyed and pure iron powder to achieve the best mechanical characteristics.
Materials and Methods. The powders of the Höganäs company were sintered at a temperature of 900-1150 ºC for 0.5–2.5 hours. The protective gas medium (dissociated ammonia) made it possible to prevent oxidative and other sintering reactions. For static cold pressing, a hydraulic press 2PG-125 with a maximum force of 1250 kN was used.
Results. For the first time, the presence of intracrystalline bonding mechanisms with different intensity during sintering has been experimentally established. The dependences of the increment of the relative area of the contact surface on the duration of the isothermal exposure were constructed. With an increase in the sintering temperature to 1150 ºC and a holding time of more than 80 minutes, the contact surface area gradually increased. It was shown that the samples from the powder grades under consideration formed an intracrystalline bonding on the entire contact surface at 1150 ºC. Therefore, this technology can be recommended for practical use. The addition of graphite to the charge slows down the growth of the contact surface. At the same time, the molds from pure powder ABC100.30 and from Distaloy HP-1 powder showed differences. In the first case, with the addition of graphite to the charge, the contact surface developed more intensively than in the second one. The obtained results were recorded in the photo and visualized in the form of graphs.
Discussion and Conclusion. According to the results of mechanical tests, it is possible to estimate the proportion of the contact section of the molding with intracrystalline bonding. Its feature is the structural correspondence of the interparticle surface of the splice and the intergrain boundary. The value of this boundary is determined by comparing the relative area of the contact section with the intracrystalline bonding and the relative area of the contact surface. The possibilities of improving the quality of bonding of powder steels by increasing the temperature and time of their exposure during sintering are determined.

Keywords: metal powders, interparticle bonding, hot-deformed powder materials, intracrystalline bonding, interparticle surface, grain boundary

Acknowledgements: the authors would like to thank the engineers of the Materials Science and Technology of Metals Department YuP Pustovoit, VI Popravko for their help in preparing samples and setting up measuring equipment, as well as Dr. Sci. (Eng), Professor Zhanna Vladimirovna Eremeeva for scientific advice on the choice of experimental methods.

For citation. Egorov MS, Egorova RV. Development of Interparticle Bonding during Sintering of Metal Powders with the Addition of Carbon. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(3):55–65. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-55-65

Введение. В промышленности широко применяются спеченные детали из традиционных и новых составов. К последним можно отнести частично легированные порошки, нанопорошки. Появление новых исходных конструкционных материалов требует дополнительного изучения процессов формирования консолидированных материалов на всех технологических этапах.

С начала двухтысячных годов отмечается растущий интерес ученых к данной теме [1–7]. Изучалось, например, межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов. Описывались особенности низколегированных конструкционных сталей в таких процессах. Рассматривались деформация и уплотнение порошковых материалов. Выявлялись закономерности механических свойств в зависимости от режимов термической обработки, что также влияет на качество межчастичных контактов порошковых материалов. Работы [8–10] фокусируются на изучении углеродосодержащих материалов для изготовления порошковых деталей из твердых сплавов. Кроме того, моделируется процесс спекания при различных режимах.

В ранних работах авторов представленной статьи исследовался процесс спекания в зависимости от структурных изменений материала. Описаны снятие остаточных напряжений после прессования, изменение физических и механических свойств, восстановление оксидов, рекристаллизации и т. д. Отметим, что спекание порошковых сталей — сложный и не до конца изученный процесс. Настоящая работа продолжает исследование межчастичных взаимодействий порошковых сталей. Раскрывается связь их механических свойств и качества внутрикристаллитного сращивания. Авторы впервые продемонстрировали кинетику развития внутрикристаллитного сращивания для исследуемых материалов во времени спекания. Проанализированы различные режимы спекания образцов, оценены доли контактного сечения формовки с внутрикристаллитным сращиванием порошковых материалов.

Цель исследования — выяснить, как спекание влияет на межчастичное сращивание и структуру порошковых сплавов с железом и углеродом. Задача — изучить технологические режимы спекания образцов из легированного и чистого железного порошка для достижения максимальных механических характеристик, которые обеспечивают формирование качественного межчастичного сращивания.

Материалы и методы. При спекании формирование контактной поверхности порошкового материала рассматривается с позиций ее начального состояния, которое меняется во время выдержки при высокой температуре. То есть речь идет о последовательном приращении контактной поверхности.

Для статического холодного прессования задействовали гидравлический пресс 2ПГ-125 с максимальным усилием 1250 кН. Спекание проводили при температуре 900–1150 °C в течение 0,5–2,5 часа. Для предотвращения окислительных и других реакций спекания обеспечили защитную газовую среду (диссоциированный аммиак).

В работе использовались железные порошки шведской фирмы Höganäs [1–3] (таблица 1).

Таблица 1

Виды и характеристики используемых порошков шведской компании Höganäs

Марка порошка	Способ получения
ABC100.30	Распыление железного расплава
Distaloy HP-1	Двойное диффузионное легирование порошка Astaloy 85Mo:1,5% Mo+4%Ni,2%Cu

Данные об общем химическом составе представлены в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав исследуемых порошков

Марка порошка	Содержание элементов, масс. %								
	C	O	Mo	Ni	Cu	Mn	Si	S	P
ABC100.30	0,001	0,04	–	–	–	0,06	0,007	0,01	0,004
Distaloy HP-1	0,01	0,08	1,5	4	2	0,08	0,005	0,03	0,003

В рассматриваемых процессах спекание — это и окончательная, и промежуточная операция [1–4]. В первом случае консолидация материала заканчивается на этой стадии. Процесс спекания помимо структурных изменений материала способствует:

– снятию остаточных напряжений после прессования;
– изменению физических и механических свойств материала;
– восстановлению оксидов;
– рекристаллизации и т. д.

Определяющие технологические параметры спекания прессовок: температурный режим, продолжительность спекания, параметры предварительной обработки частиц материала давлением и др.

Во втором случае последующее термомеханическое воздействие играет существенную роль в структурообразовании материала, и спекание рассматривается как подготовительная стадия, основное назначение которой — гомогенизация металлической основы.

С развитием базовых положений работ [1, 2, 5] уточнялась сущность интенсивности и эффективности спекания. Эти показатели позволяют судить об изменении размеров, развитии структуры и свойств спеченных материалов. Согласно работам [5–8] создана методика определения относительной площади контактной поверхности пористого тела.

Результаты исследования. При спекании шихт из порошков ABC.100.30 и Distaloy HP–1 получили зависимости развития контактной поверхности от исходной плотности, температуры и времени спекания (рис. 1, 2). При этом ориентировались на материал, изложенный в [5].

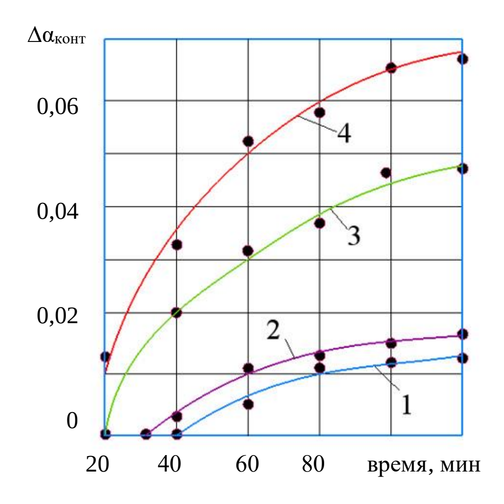


Рис. 1. Зависимость приращения относительной площади контактной поверхности от длительности изотермической выдержки при спекании формовки из порошка ABC100.30+0,5 %С для разных исходных плотностей и температур: 1 — 950 ºС, 7,35 г/см^3; 2 — 1150 ºС, 7,35 г/см^3; 3 — 950 ºС, 6,9 г/см^3; 4 — 1150 ºС, 6,9 г/см^3

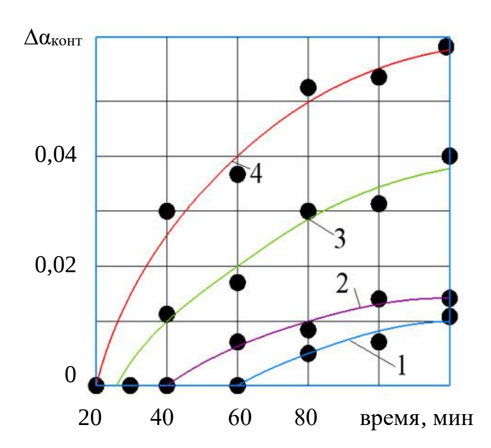


Рис. 2. Зависимость приращения относительной площади контактной поверхности от длительности изотермической выдержки при спекании формовки из порошка Distaloy HP–1+0,5 %С для разных исходных плотностей и температур: 1 — 950 ºС, 7,4 г/см^3; 2 — 1150 ºС, 7,4 г/см^3; 3 — 950 ºС, 6,6 г/см^3; 4 — 1150 ºС, 6,6 г/см^3

С повышением температуры и времени спекания площадь контактной поверхности монотонно увеличивается, интенсивность затухает по мере увеличения длительности спекания.

У формовок из чистого порошка ABC100.30 с добавлением в шихту графита контактная поверхность развивается интенсивнее по сравнению с формовками из порошка Distaloy HP-1. Это можно объяснить. Дело в том, что к поверхности железных частиц порошка Distaloy HP-1 припекаются более мелкие частицы меди, никеля и молибдена. Они образуют в Fe_γ твердые растворы, что затрудняет протекание диффузионных процессов (по сравнению с чистым металлом). Как следствие, замедляется рост контактной поверхности.

Интенсивность формирования контактной поверхности зависит от исходной относительной плотности. Повышение данного показателя замедляет процесс, так как приближение структуры материала к беспористому состоянию снижает движущую силу консолидации.

Добавление в шихту графита замедляет рост контактной поверхности. Это объясняется снижением коэффициента самодиффузии атомов железа, особенно на начальной стадии спекания в приконтактных областях с повышенным содержанием углерода.

Посмотрим, как содержание углерода влияет на прочность спеченных сплавов при различных режимах спекания (рис. 3, 4).

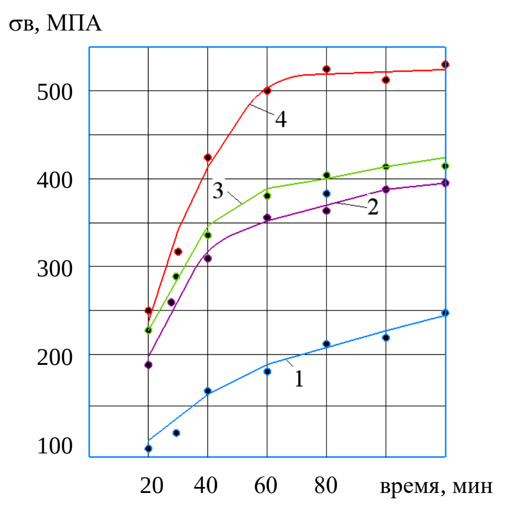


Рис. 3. Зависимость предела прочности спеченной формовки из порошка АВС100.30+0,5%С от времени изотермической выдержки и исходной плотности: 1 — 6,9 г/см^3, 950 ºС; 2 — 6,9 г/см^3, 1150 ºС; 3 — 7,35 г/см^3, 950 ºС; 4 — 7,35 г/см^3, 1150 ºС

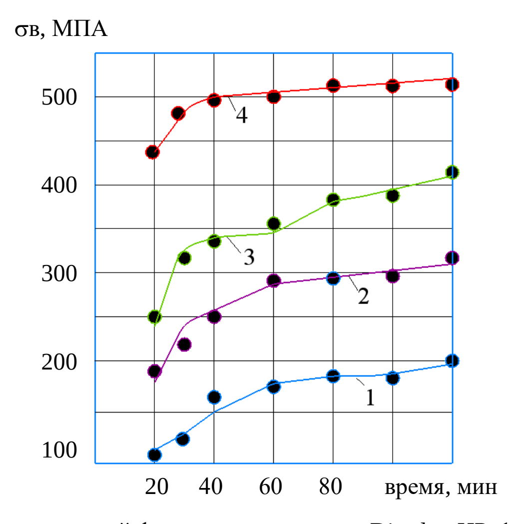


Рис. 4. Зависимость предела прочности спеченной формовки из порошка Distaloy HP–1+0,5%С от времени изотермической выдержки и исходной плотности: 1 — 6,9 г/см^3, 950 ºС; 2 — 6,9 г/см^3, 1150 ºС; 3 — 7,35 г/см^3, 950 ºС; 4 — 7,35 г/см^3, 1150 ºС

Предел прочности материала на основе порошка АВС100.30 с содержанием углерода 0,5 % — 610 МПа, предел прочности материала на основе порошка Distaloy HP–1 с содержанием углерода 0,5 % — 508 МПа.

По результатам механических испытаний и значению предела прочности эталонных образцов определена относительная площадь контактного сечения с внутрикристаллитным сращиванием ($\alpha'_{ВКС}$) в зависимости от исходной плотности и режимов спекания формовок из порошков АВС.100.30+0,5 %С (рис. 5) и DistaloyHP–1+0,5 %С (рис. 6).

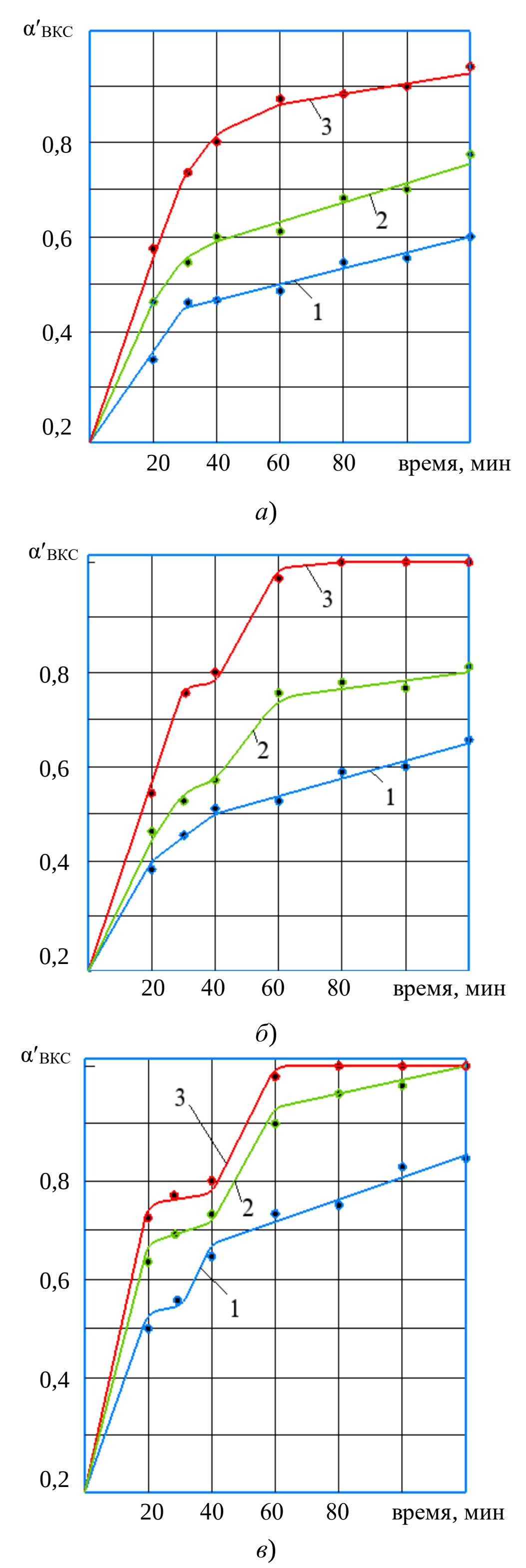


Рис. 5. Кинетика развития внутрикристаллитного сращивания на контактной поверхности в зависимости от режимов спекания и исходной плотности (АВС.100.30+0,5%С): *а* — 6,9 г/см^3; *б* — 7,2 г/см^3; *в* — 7,35 г/см^3. 1 — 950 °С, 2 — 1050 °С, 3 —1150 °С

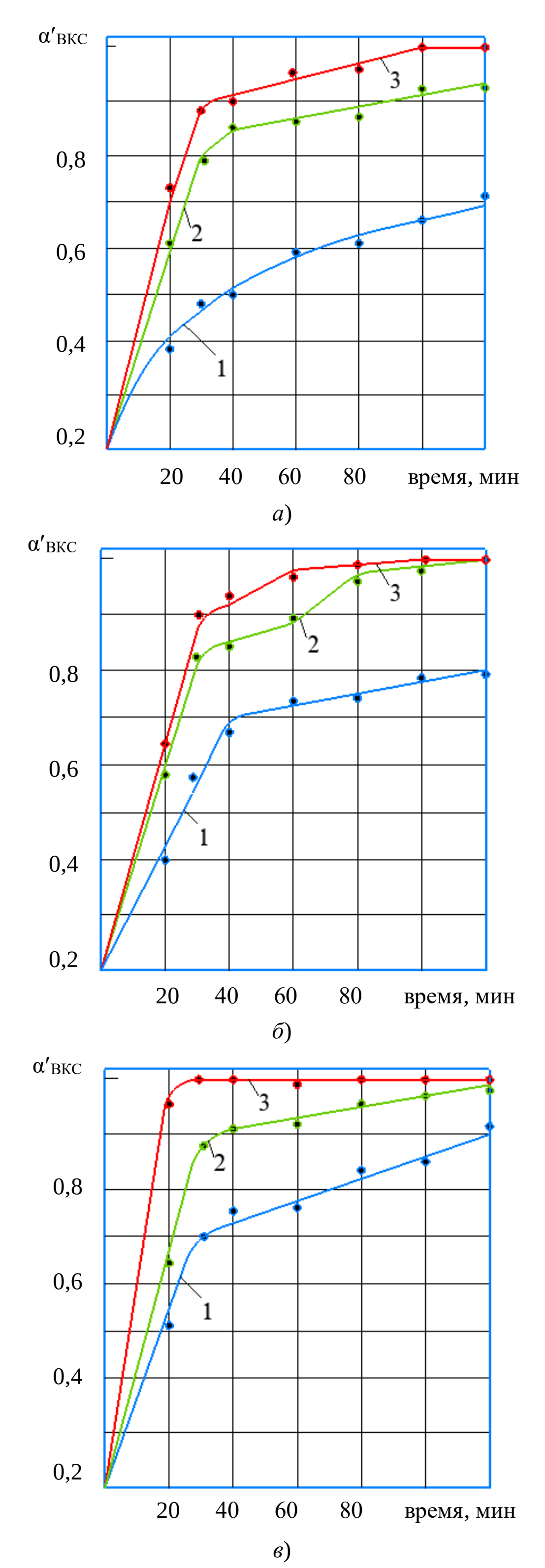


Рис. 6. Кинетика развития внутрикристаллитного сращивания на контактной поверхности в зависимости от режимов спекания и исходной плотности (DistaloyHP–1+0,5%C): *а* — 6,6 г/см^3; *б* — 7 г/см^3; *в* — 7,4 г/см^3. 1 — 950 ºС, 2 — 1050 ºС, 3 — 1150 ºС

Представленные зависимости свидетельствуют, что введение в шихту графита интенсифицирует процессы формирования внутрикристаллитного сращивания по сравнению с материалами из безуглеродной шихты. Результаты исследований совпадают с данными работ [9–11].

В процессе спекания при нагреве и изотермической выдержке поверхностные слои железных и графитовых частиц непрерывно взаимодействуют через их контактные участки (включая газовую фазу) [12–15]. Отметим, что углерод — активный восстановитель оксидов железа, поэтому при температуре выше 500–600 °С в местах контакта частиц железа с графитом протекают реакции восстановления. Это способствует формированию

ювенильного контакта с последующим сращиванием частиц. Создаются благоприятные условия образования углеродосодержащей газовой среды за счет реакций между частицами графита и железа. Восстановительные процессы интенсифицируются благодаря значительному росту кинетики химических реакций на границе металл — газ. Рост фиксируется относительно коэффициентов диффузии в контактных участках частиц железа с графитом и по всей поверхности частиц. Учитываются также поверхности, контактирующие с атмосферой печи. При этом через образовавшиеся металлические контакты на поверхности частиц углерод диффундирует в частицы железа. До превращения $\alpha \rightarrow \gamma$ наиболее вероятным будет образование фазы в контактных местах цементита. У данной фазы — более значительный коэффициент диффузии углерода при рассматриваемых температурах. Это обусловлено незначительным растворением углерода в α-железе и медленной диффузией в феррите.

Если контактная поверхность материала из железного порошка развивается интенсивнее, чем у материала из легированного порошка, то именно последний следует предпочесть при формировании внутрикристаллитного сращивания.

Внутрикристаллитное сращивание формируется в два этапа:

– изотермическая выдержка формовки в аустенитной области;

– охлаждение с распадом аустенита на феррито-цементитную смесь.

Роль второй стадии заключается в преобладающем развитии межчастичной поверхности сращивания как области облегченного зарождения зерен феррита и цементитных пластин, обеспечивающих миграцию границы через поверхность физического раздела частиц. Это подтверждают результаты микроструктурного анализа. На рис. 7–10 показаны микроструктуры материала с различным уровнем межчастичного сращивания.

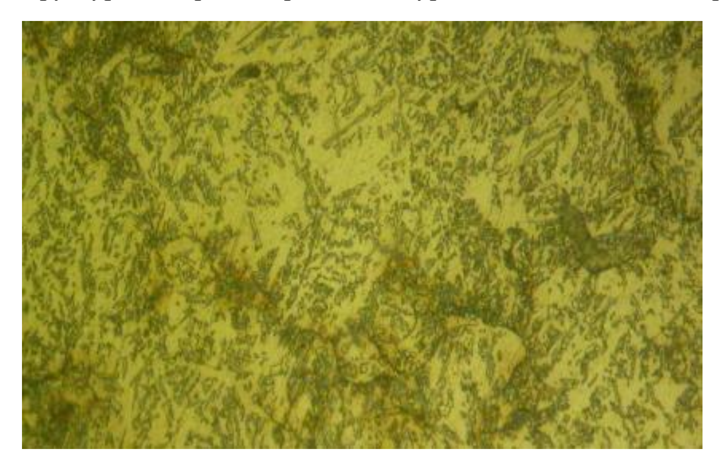


Рис. 7. Микроструктура образца из порошка ABC100.30+0,5 %C после спекания при 1050 ºC в течение 40 мин, ×200

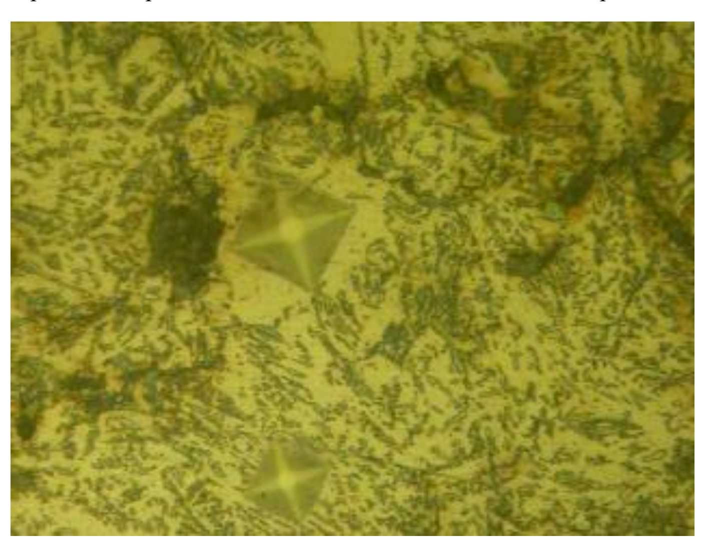


Рис. 8. Микроструктура образца из порошка Distaloy HP–1+0,5 %C после спекания при 1050 ºC в течение 20 мин, ×200

Представленные микроструктуры характерны для низкого уровня сращивания, так как отчетливо проявляется граница частиц порошка.

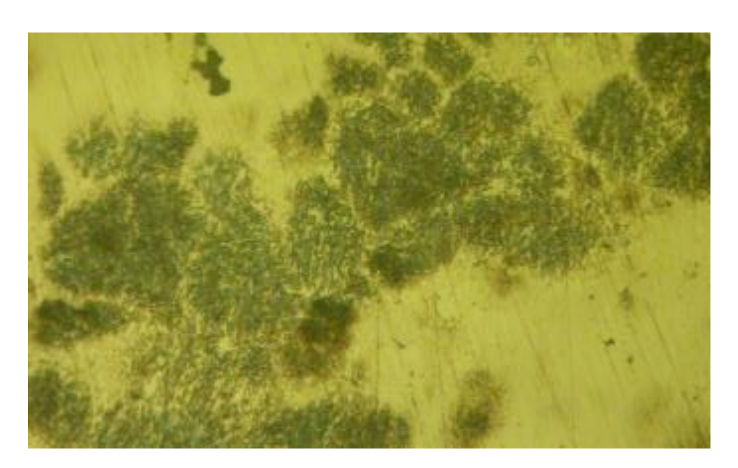


Рис. 9. Микроструктура образца из порошка АВС100.30+0,5 %С после спекания при 1150 ºС в течение 40 мин, ×500

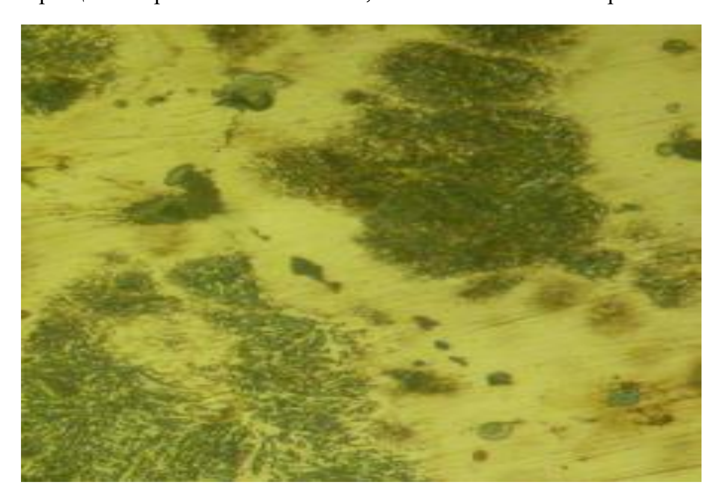


Рис. 10. Микроструктура образца из порошка Distaloy HP–1+0,5 %С после спекания при 1150 ºС в течение 40 мин, ×500

Неметаллические включения идентифицируют бывшую границу физического раздела частиц, через которую прорастают зерна феррита. То есть бывшая граница раздела частиц находится внутри зерна, и это признак внутрикристаллитного сращивания [16].

Обсуждение и заключение. Итоги работы позволяют утверждать, что при спекании действуют разные по интенсивности механизмы формирования внутрикристаллитного сращивания [5, 9, 16]. Сначала сращивание идет быстро, затем его скорость снижается. Прессовки с наименьшими значениями исходной плотности отличаются наибольшей продолжительностью процесса ускоренного развития внутрикристаллитного сращивания, который наблюдается на первой стадии. Причем с повышением температуры спекания увеличивается интенсивность этой стадии. Формирование внутрикристаллитного сращивания на всей контактной поверхности отмечается у формовок, полученных в условиях спекания при температуре 1150 ºС. Экспериментально установлена особенность формовок из порошков DistaloyHP–1 и АВС100.30. В условиях спекания внутрикристаллитное сращивание происходит в течение 60 и 80 минут соответственно.

Список литературы

1. Дорофеев В.Ю., Егоров С.Н. *Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов*. Москва: Металлургиздат; 2003. 152 с.

2. Егоров М.С., Егоров С.Н. *Горячедеформированные порошковые низколегированные конструкционные стали*. Новочеркасск: Волгодонский институт Южно-Российского государственного технического университета; 2008. 54 с.

3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. 2011;2:13–19 https://cyberleninka.ru/article/n/materialy-dlya-vysokoteplonagruzhennyh-detaley-gazoturbinnyh-dvigateley/viewer

4. Егорова Р.В. Микроструктурный анализ поверхности ступенчатой формы. *Металлург*: 2009;6:65–67.

5. Григорьев А.К., Рудской А.И. *Деформация и уплотнение порошковых материалов*. Москва: Металлургия; 2002. 192 с.

6. Robert-Perron E., Blais C., Pelletier S. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state. *Powder Metallurgy*. 2009;52(1):80–83. https://doi.org/10.1179/174329007X205055

7. Штерн М.Б., Картузов Е.В. Особенности возникновения и распространения ударных волн в высокопористых материалах. *Порошковая металлургия*. 2016;3/4:13–22.

8. Глотка А.А., Мороз А.Н. Сравнительное влияние карбидов и неметаллических включений на образование усталостных микротрещин в сталях. *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2019;8(770);61–65. https://doi.org/10.30906/mitom.2019.8.61-65

9. Гуревич Ю.Г., Анциферов В.Н., Савиных Л.М. *Износостойкие композиционные материалы*. В.Г. Бамбуров (ред.). Екатеринбург: УрО РАН; 2005. 215 с

10. Егоров М.С., Егорова Р.В., Ковтун М.В. Влияние содержания углерода на формирование контактной межчастичной поверхности при горячей допрессовке. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(2):90–101. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101

11. Hironobu Kondo, Hegedus M. Current trends and challenges in the global aviation industry. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2020;26(4):141–143. https://doi.org/10.36547/ams.26.4.763

12. Gilardi R., Alzati L., Oro R., Hryha E., Nyborg L., Berg S., et al. Reactivity of Carbon Based Materials for Powder Metallurgy Parts and Hard Metal Powders Manufacturing. *Society of Powder and Powder Metallurgy*. 2016;63(7):548–554. https://doi.org/10.2497/jjspm.63.548

13. Rojek J., Nosewicz S., Mazdziarz M., Kowalczyk P., Wawrzyk K., Lumelskyj D. Modeling of a Sintering Process at Various Scales. *Procedia Engineering*. 2017;177:263–270. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.210

14. Guo J.Y., Xu C.X., Hu A.M., Oakes K.D., Sheng F.Y., Shi Z.L., et al. Sintering dynamics and thermal stability of novel configurations of Ag clustersю *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2012;73(11).1350–1357. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.06.010

15. Еремеева Ж.В., Никитин Н.М., Коробов Н.П., Тер-Ваганянц Ю.С. Исследование процессов термической обработки порошковых сталей, легированных наноразмерными добавками. *Нанотехнологии: наука и производство.* 2016;1:63–74.

16. Егоров М.С., Егорова Р.В., Цорданиди Г.Г. Формирование структурных особенностей порошковых материалов при охлаждении после термической обработки. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;(2):69–75. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-69-75

References

1. Dorofeev VYu, Egorov SN. *Mezhchastichnoe srashchivanie pri formirovanii poroshkovykh goryachedeformirovannykh materialov*. Moscow: Metallurgizdat; 2003. 152 p.

2. Egorov MS, Egorov SN. *Goryachedeformirovannye poroshkovye nizkolegirovannye konstruktsionnye stali.* Novocherkassk: Volgodonsk Institute of the South Russian State Technical University; 2008. 54 p.

3. Kablov YeN, Ospennikova OG, Bazyleva OA. Materials for parts of gas-turbine engines under high heat loads. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2011;2:13–19 https://cyberleninka.ru/article/n/materialy-dlya-vysokoteplonagruzhennyh-detaley-gazoturbinnyh-dvigateley/viewer

4. Egorova RV. Microstructure analysys of surface for details of stepped form. *Metallurg*: 2009;6:65–67.

5. Grigorev AK, Rudskoi AI. *Deformatsiya i uplotnenie poroshkovykh materialov.* Moscow: Metallurgiya; 2002. 192 p.

6. Robert-Perron E, Blais C, Pelletier S. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state. *Powder Metallurgy*. 2009;52(1):80–83. https://doi.org/10.1179/174329007X205055

7. Shtern MB, Kartuzov EV. Osobennosti vozniknoveniya i rasprostraneniya udarnykh voln v vysokoporistykh materialakh. *Powder Metallurgy*. 2016;3/4:13–22.

8. Glotka AA, Moroz AN. Comparison of the effects of carbides and nonmetallic inclusions on formation of fatigue microcracks in steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov.* 2019;8(770);61–65. https://doi.org/10.30906/mitom.2019.8.61-65

9. Gurevich YuG, Antsiferov VN, Savinykh LM. Iznosostoikie kompozitsionnye materialy. VG Bamburov (Ed.). Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005. 215 p

10. Egorov MS, Egorova RV, Kovtun MV. Influence of Carbon Content on the Formation of a Contact Interparticle Surface during Hot Post-Pressing. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):90–101. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101

11. Hironobu Kondo, Hegedus M. Current trends and challenges in the global aviation industry. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2020;26(4):141–143. https://doi.org/10.36547/ams.26.4.763

12. Gilardi R, Alzati L, Oro R, Hryha E, Nyborg L, Berg S, et al. Reactivity of Carbon Based Materials for Powder Metallurgy Parts and Hard Metal Powders Manufacturing. *Society of Powder and Powder Metallurgy*. 2016;63(7):548–554. https://doi.org/10.2497/jjspm.63.548

13. Rojek J, Nosewicz S, Mazdziarz M, Kowalczyk P, Wawrzyk K, Lumelskyj D. Modeling of a Sintering Process at Various Scales. *Procedia Engineering*. 2017;177:263–270. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.210

14. Guo JY, Xu CX, Hu AM, Oakes KD, Sheng FY, Shi ZL, et al. Sintering dynamics and thermal stability of novel configurations of Ag clustersю *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2012;73(11).1350–1357. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.06.010

15. Eremeeva ZhV, Nikitin NM, Korobov NP, Ter-Vaganyants YuS. Issledovanie protsessov termicheskoi obrabotki poroshkovykh stalei, legirovannykh nanorazmernymi dobavkami. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo.* 2016;1:63–74.

16. Egorov MS, Egorova RV, Tsordanidi GG. Formation of structural features of powder materials during cooling after heat treatment. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;(2):69–75. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-69-75

Поступила в редакцию 29.06.2023
Поступила после рецензирования 19.07.2023
Принята к публикации 23.07.2023

Об авторах:

Максим Сергеевич Егоров, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, ScopusID, ResearcherID, AuthorID, aquavdonsk@mail.ru

Римма Викторовна Егорова, кандидат технических наук, доцент кафедры кибербезопасности Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, ScopusID, ResearcherID, AuthorID, rimmaruminskaya@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

М. С. Егоров — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, расчеты, подготовка текста, формулирование выводов.

Р. В. Егорова — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

*Конфликт интересов:*авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 29.06.2023
Revised 19.07.2023
Accepted 23.07.2023

About the Authors:

Maksim S. Egorov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, ScopusID, ResearcherID, AuthorID, aquavdonsk@mail.ru

Rimma V. Egorova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Cybersecurity Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, ScopusID, ResearcherID, AuthorID, rimmaruminskaya@gmail.com

Claimed contributorship:

MS Egorov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study; calculations; text preparation, conclusions formulation.

RV Egorova: academic advising; research results analysis; text revision; conclusions correction.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

УДК 669.017 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-66-76

Влияние структурно-фазового состояния исходного материала шихты на качественные характеристики отливок из сплава системы Al-Si-Mg

В.С. Муратов, М.С. Казаков ✉
Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
✉Kazakov.mishel@gmail.com

Аннотация
Введение. Работа фокусируется на решении проблем качества отливок из сплава Al-Si-Mg (АК9). Отмечены отсутствие единой теории модифицирования сплавов и необходимость поиска решений, обеспечивающих хорошее качество продукции. Рассматриваются причины брака из-за слабого обоснования выбора производителя исходного шихтового материала — чушек. Чушки от двух поставщиков сравниваются с точки зрения структурно-фазового состояния. Показано, как оно обусловливает дефекты отливок. Отмечена неэффективность традиционных методов подавления образования хрупких пластин железосодержащей фазы в сплаве системы Al-Si-Mg за счет присутствия в химическом составе сплава Mn. Если указанный недостаток наследуется из исходного материала, общепринятый подход не срабатывает. Сформулированы рекомендации по решению этой выявленной проблемы. Внедрение предложенного подхода в производственную практику способно открыть путь к решению важной прикладной задачи — улучшить формулировки заданий для тендеров. Актуальность исследования обусловлена широким применением сплавов системы Al-Si-Mg (АК9) в современном машиностроении, в том числе в аэрокосмических конструкциях. Цель данной работы — изучить влияние структурно-фазового состояния исходного материала на качественные характеристики готовых отливок из сплава системы Al-Si-Mg.
Материалы и методы. Проанализированы восемь плавок, в которых использовались чушки двух производителей. Рентгенография позволила выявить корреляцию между строением излома отливок, структурой и качественными показателями. Для анализа микроструктуры и химического состава фаз использовали сканирующую электронную микроскопию. Устанавливая требования к качеству, исходили из действующих отраслевых и государственных стандартов. Из этих же документов брали условия термической обработки образцов. Спектрограммы визуализировали в виде графиков, демонстрирующих интенсивность пика элемента в оже-спектре и энергию электронов, возникших в результате оже-эффекта.
Результаты исследования. Результаты рентгенографии дают основания утверждать, что продукция, предоставляемая поставщиком № 1, обладает значимыми преимуществами в плане качества. Если ориентироваться на отраслевой стандарт, исключение из процесса чушек 2-го поставщика обеспечивает выпуск продукции без литейных дефектов на уровне 73 %. В противном случае этот показатель не превысил 57 %. Браковочными индикаторами были несплошности, скопления раковин, высокая пористость. После плавок 5–8, которые задействовали материалы 2-го производителя, исследовались изломы образцов после разрыва. Выделены локации с гладким, вязким и смешанным рельефом. Увеличение до ×500 позволило установить незначительные участки с вязким рельефом, что характерно для хрупкого разрушения по механизму скола. Установлено отсутствие включений и ликваций. Рассмотрена микроструктура шлифов из разрывных образцов. Выяснилось, что она соответствует модифицированному и термообработанному состоянию сплава АК9ч без признаков пережога. Отмечены отдельные темные игольчатые фазы и единичные поры. Описаны условия дисперсных выделений Si, выкрашивания $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$, а также выделение фазы $Al_{36}Si_3Fe_6Mn_3$ в скелетообразной форме. Перечислены преимущества микроструктуры образцов чушек от производителя № 1.

Она соответствует модифицированному состоянию сплава АК9ч. Ветви дендритов и размеры включений кремния меньше. Не обнаруживаются иглообразные фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$.
Обсуждение и заключение. Светлые участки в изломах отливок образовались по хрупкому механизму разрушения, что связано с наличием в структуре сплава пластин фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$. Если железосодержащие фазы наследуются из исходного материала, то традиционные методы подавления образования не приводят к созданию компактных равноосных полиэдров. Для повышения качества отливок рекомендуется использовать чушки с предварительно модифицированной структурой, без включения пластин фазы переменного состава $Al_xSi_yFe_zMn_q$. Полученные результаты можно задействовать в том числе для обоснования требований к материалу при проведении тендеров, что даст возможность предприятиям машиностроительной отрасли улучшить качество продукции и снизить затраты на брак. В итоге это повысит их конкурентоспособность на российском и мировом рынке.

Ключевые слова: хрупкие пластины железосодержащей фазы, сплав системы Al-Si-Mg, чушки с модифицированной структурой, качество шихты

Благодарности: авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Для цитирования. Муратов В.С., Казаков М.С. Влияние структурно-фазового состояния исходного материала шихты на качественные характеристики отливок из сплава системы Al-Si-Mg. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):66–76. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-66-76

Original article

Influence of the Structural-Phase Composition of the Initial Charge Material on the Qualitative Characteristics of Castings from Al-Si-Mg System Alloy

Vladimir S. Muratov, Mikhail S. Kazakov ✉
Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
✉Kazakov.mishel@gmail.com

Introduction. The work focuses on solving quality problems of castings made of Al-Si-Mg alloy (AK9). The paper draws attention to the absence of a unified theory of alloy modification and the need to find solutions that ensure good product quality. The reasons for bad quality due to the weak justification of the choice of the manufacturer of the initial charge material — ingots are considered. Ingots from two suppliers are compared in terms of the structural-phase state. The paper shows how it causes defects in castings. The inefficiency of traditional methods of suppressing the formation of brittle plates of the iron-containing phase in the alloy of the Al-Si-Mg system due to the presence of Mn in the chemical composition of the alloy is noted. If the specified flaw is inherited from the source material, the generally accepted approach does not work. The article formulates the recommendations for solving this problem. The introduction of the proposed approach into production practice can open the way to solving an important applied task — to improve the wording of tasks for tenders. The relevance of the study is due to the widespread use of alloys of the Al-Si-Mg (AK9) system in modern mechanical engineering, including in aerospace structures. The work objective is to study the influence of the structural-phase state of the source material on the qualitative characteristics of finished castings from the Al-Si-Mg alloy system.
Materials and Methods. Eight casts were analyzed, in which ingots from two manufacturers were used. Radiography revealed a correlation between the fracture structure of castings, structure and quality indicators. Scanning electron microscopy was used to analyze the microstructure and chemical composition of the phases. When setting quality requirements, the authors proceeded from the existing industry and state standards. The conditions of heat treatment of samples were taken from the same documents. The spectrograms were visualized as graphs showing the intensity of the element peak in the Auger spectrum and the energy of the electrons resulting from the Auger effect.
Results. The results of radiography gave grounds to assert that the products provided by supplier No. 1 had significant advantages in terms of quality. If we focused on the industry standard, the exclusion of the 2nd supplier's ingots from the process ensured the production of products without casting defects at the level of 73 %. Otherwise, this figure did not exceed 57 %. The rejection indicators were discontinuities, clusters of flaws, high porosity. After melting 5-8, which involved the materials of the 2nd manufacturer, the fractures of the samples after rupture were investigated. Locations with smooth, viscous and mixed relief are highlighted. An increase of up to ×500 made it possible to establish insignificant areas with a viscous relief, which was characteristic of brittle fracture by the cleavage mechanism. The absence of

inclusions and liquations was established. The microstructure of the sections from discontinuous samples was considered. It turned out that it corresponded to the modified and heat-treated state of the AK9ch alloy without signs of burnout. Individual dark needle-like phases and single pores were noted. The conditions of dispersed Si precipitations, $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ and $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$ chipping, as well as the separation of the $Al_{36}Si_3Fe_6Mn_3$ phase in skeletal form were described. The advantages of the microstructure of ingots samples from manufacturer No. 1 were listed. It corresponded to the modified state of the AK9ch alloy. The branches of dendrites and the sizes of silicon inclusions were smaller. Needle-like phases of $Al_xSi_yFe_zMn_q$ were not detected.

Discussion and Conclusion. Light areas in the castings fractures were formed by a brittle fracture mechanism, which is due to the presence of $Al_xSi_yFe_zMn_q$ phase plates in the alloy structure. If iron-containing phases are inherited from the source material, then traditional methods of suppressing formation do not lead to the creation of compact equiaxed polyhedra. To improve the quality of castings, it is recommended to use ingots with a pre-modified structure, without including phase plates of variable composition $Al_xSi_yFe_zMn_q$. The results obtained can be used, among other things, to justify the requirements for the material during tenders, which will enable the enterprises of the machine-building industry to improve the quality of products and reduce the cost of marriage. As a result, this will increase their competitiveness in the Russian and world markets.

Keywords: brittle plates of the iron-containing phase, Al-Si-Mg system alloy, structure-modified ingots, charge quality

Acknowledgements: the authors would like to thank the Editorial Board of the Journal and the Reviewer for attentive attitude to the article and suggestions made that helped to improve its quality.

For citation. Muratov VS, Kazakov MS. Influence of the Structural-Phase Composition of the Initial Charge Material on the Qualitative Characteristics of Castings from Al-Si-Mg System Alloy. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3):66–76. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-66-76

Введение. Согласно ГОСТ 1583-93[1] сплавы системы Al-Si-Mg (АК9) относятся к первой группе (силумины). Они широко используются в современном машиностроении. В аэрокосмических конструкциях на отливки из алюминиевых сплавов приходится 3–5 % массы [1].

Применение литых заготовок в сравнении с деформированным полуфабрикатом позволяет уменьшить трудоемкость механической обработки деталей и в несколько раз повысить коэффициент использования металла [2]. В аэрокосмической отрасли из данного сплава изготавливают сложные по конфигурации детали, работающие при средних нагрузках и температурах от минус 196 до плюс 175 °C[2]. Основные характеристики сплава:

– хорошие литейные свойства;
– герметичность;
– коррозионная стойкость;
– свариваемость;
– малая плотность;
– относительно высокий модуль упругости;
– низкий температурный коэффициент линейного расширения;
– износостойкость;
– доступная цена [3–7].

Свойства силуминов зависят от условий выплавки и последующей обработки [8]. Действенный метод улучшения их структуры и свойств — модификация многокомпонентными составами. Это позволяет воздействовать не только на кремний, входящий в состав эвтектики (α+Si), но и на кристаллы первичного кремния [9–10]. Отметим необходимость эффективно бороться с таким недостатком сплавов Al-Si-Mg, как газопоглощение. С этой целью применяют дегазирующие флюсы и модифицирование при пониженных температурах [11]. В настоящее время нет единой теории модифицирования, поэтому продолжается поиск оптимальных решений, позволяющих обеспечить высокий уровень качества продукции, соответствие нормативной и конструкторской документации [11]. Представленная работа призвана отчасти восполнить имеющийся в этой сфере недостаток данных.

В повышении качества отливок ведущая роль принадлежит контролю. Его задачи:

[1] ГОСТ 1583-93. *Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия*. Библиотека ГОСТов. URL: http://vsegost.com/Catalog/18/18745.shtml (дата обращения: 22.06.2023).
[2] ОСТ 92-0920-85. *Металлы и сплавы цветные. Марки, разрешенные к применению*. Техническая литература. URL: https://booktech.ru/normativy/ost/ost-92-0920-85-metally-i-splavy-cvetnye-marki-razreshennye-k-primeneniyu.html (дата обращения: 22.06.2023).

– исключить попадание дефектных отливок на механическую обработку и сборку;
– создать условия для критического анализа и совершенствования технологии литейного производства.

Сложность технологических процессов литейных цехов связана с использованием широкой номенклатуры материалов. Формирование качества отливок обусловливается многими факторами. Наиболее критичные из них:
– качество исходных формовочных, шихтовых и вспомогательных материалов;
– уровень механизации и автоматизации технологического процесса;
– соблюдение технологического процесса на всех стадиях производства;
– организация производства и управления цехом.

В рамках представленной работы анализируются причины роста брака, связанного с недостаточно обоснованным выбором производителя шихтового материала — чушек. Даются рекомендации по устранению данной проблемы. Выполнен сравнительный анализ структурно-фазового состояния исходного материала от двух поставщиков. Показано, как дефекты в отливках сплава системы Al-Si-Mg зависят от структурно-фазового состояния исходных шихтовых материалов.

Следует признать неэффективность традиционных методов подавления образования хрупких пластин железосодержащей фазы в сплаве системы Al-Si-Mg за счет обязательного присутствия в химическом составе сплава Mn. Речь идет о случаях, когда указанный недостаток наследуется из исходного материала. Сформулированы рекомендации по решению этой выявленной проблемы. Для повышения качества отливок целесообразно использовать шихту из чушек с предварительно модифицированной структурой. В ней не должно быть включения пластин фазы переменного состава AlxSiyFezMnq.

Цель данной работы — изучить влияние структурно-фазового состояния исходного материала на качественные характеристики готовых отливок из сплава системы Al-Si-Mg.

Материалы и методы. По результатам восьми плавок проанализированы характеристики отливок из сплава АК9ч В качестве исходного материала применялись чушки от производителей № 1 и № 2. Чушки переплавлялись с отходами собственного производства (некондиционные отливки из сплава АК9ч). Процентное соотношение материалов представлено в табл. 1. Производитель выбирается по результатам конкурсной закупки из соображений экономической целесообразности. В любом случае материал должен соответствовать ГОСТ 1583-96. Метод изготовления — литье в кокиль.

Таблица 1

Процентное содержание (по массе) исходных материалов в общей плавке

№ плавки	Производитель № 1	Производитель № 2	Отходы собственного производства
1	40	0	60
2	35	0	65
3	25	0	75
4	20	0	80
5	20	5	75
6	10	20	70
7	5	20	75
8	0	20	80

Химический состав образцов определялся спектральным методом на приборе МФС-8. Механические свойства исследовались на отдельно отлитых образцах (ГОСТ 1497-84[3]) после термической обработки в режиме Т6 (закалка — 535±5 °С, охлаждение в воде, старение — 175±5 °С). Для определения механических свойств использовали разрывную машину УТС-111.2-100-22. Микроструктуру исследовали по шлифам, вырезанным из клиновых проб, чушкам и разрывным образцам, травленным в реактиве Келлера, а также на изломах. Задействовали стереоскопический микроскоп Zeiss Stemi2000-C и металлографический микроскоп Carl Zeiss AxiovertA1. Метод сканирующей электронной микроскопии реализовали с помощью микроскопа JED-2300 AnalysisStation. Химический состав фаз фиксировали методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Макроструктура оценивалась на изломах клиновых проб, а также на протравленных в щелочном растворе темплетах, вырезанных из клиновых проб и чушек. Наличие внутренних дефектов отливок определялось с помощью рентгенаппарата «Руслан-225».

Результаты исследования. Химический состав образцов от каждой плавки представлен в таблице 2.

[3] ГОСТ 1497-84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Библиотека ГОСТов. URL: http://vsegost.com/Catalog/46/4616.shtml (дата обращения: 25.06.2023).

Таблица 2

Результаты определения химического состава образцов

№ плавки	Содержание элементов, масс. %									
	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Ti	Zr	Be
1	Основа	8,71	0,22	0,28	0,44	<0,1	<0,2	0,082	<0,1	<0,1
2		9,35	0,24	0,31	0,44	0,1	<0,2	0,097	0,03	<0,1
3		8,56	0,23	0,28	0,45	0,12	<0,2	0,06	0,03	<0,1
4		9,28	0,23	0,32	0,44	0,12	<0,2	0,1	0,03	<0,1
5		8,8	0,26	0,3	0,45	0,11	<0,2	0,065	0,03	<0,1
6		8,5	0,23	0,28	0,52	0,13	<0,2	<0,05	<0,1	<0,1
7		8,8	0,26	0,3	0,45	0,11	<0,2	0,055	0,03	<0,1
8		9,28	0,23	0,32	0,44	0,12	<0,2	<0,1	<0,1	<0,1
Требования по ГОСТ 1583-93										
	Основа	8–10,5	0,17–0,30	0,2–0,5	≤0,9	≤0,3	0,3	$\sum \leq 0{,}15$		<0,1

Данные таблицы 2 доказывают, что по химическому составу материал отливок от всех садок соответствует ГОСТ 1583-93.

Результаты испытания механических свойств представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытания механических свойств

№ плавки	$\sigma_в$, МПа	δ, %
1	280	9
2	280	6
3	270	7
4	280	3
5	340	6
6	290	6
7	340	6
8	290	7
Требования по ГОСТ 1583-93		
	≥ 235	≥ 3

Из таблицы 3 видно, что по уровню механических свойств материал отливок от всех садок соответствует требованиям ГОСТ 1583-93 для состояния Т6. Сопоставляются временное сопротивление разрыву и относительное удлинение.

Рентгенография показала, что для плавок 1–4, в которых нет чушек от производителя № 2, выход годной продукции, соответствующей ОСТ 92-1165-2014 в части литейных дефектов, составил 73 %. Для плавок 5–8 выход годной продукции — 57 %. Браковочные признаки:

– несплошности в виде раковин;

– скопления раковин;

– пористость сверх допустимого уровня по рентгенэталону (рентгеновская пленка, полученная после рентгенографического контроля образца с нормированной пористостью, соответствующей определенному баллу[4]).

Исследование изломов клиновых проб показало, что для плавок 5–8 характерен излом светло-серого цвета, матовый, с мелкими, светлыми, блестящими участками различной формы и размеров (рис. 1).

[4] ОСТ 92-1165-75. *Отливки из алюминиевых сплавов. Технические требования*. Техническая литература. URL: https://booktech.ru/normativy/ost/ost-92-1165-75-otlivki-iz-alyuminievyh-splavov-tehnicheskie-trebovaniya.html (дата обращения: 21.06.2023).



Рис. 1. Внешний вид излома плавок 5–8 (увеличение ×6,5)

В микроструктуре под поверхностью изломов не выявлены включения или другие дефекты, которые однозначно обусловили бы светлые, блестящие участки. В макроструктуре некоторых плавок под поверхностью излома наблюдалась пористость 2 балла по ГОСТ 1583-93. Наличие пористости не объясняет светлые участки в изломах, так как пористость наблюдалась не на всех клиновых пробах, но внешний вид всех изломов был идентичным.

Изломы разрывных образцов, полученные после испытаний механических свойств плавок 5–8, исследовали под электронным микроскопом. Светлым, блестящим участкам (рис. 1) соответствует темный участок на рис. 2 *а*. Внешний вид поверхности разрушения при различных увеличениях представлен на рис. 2.

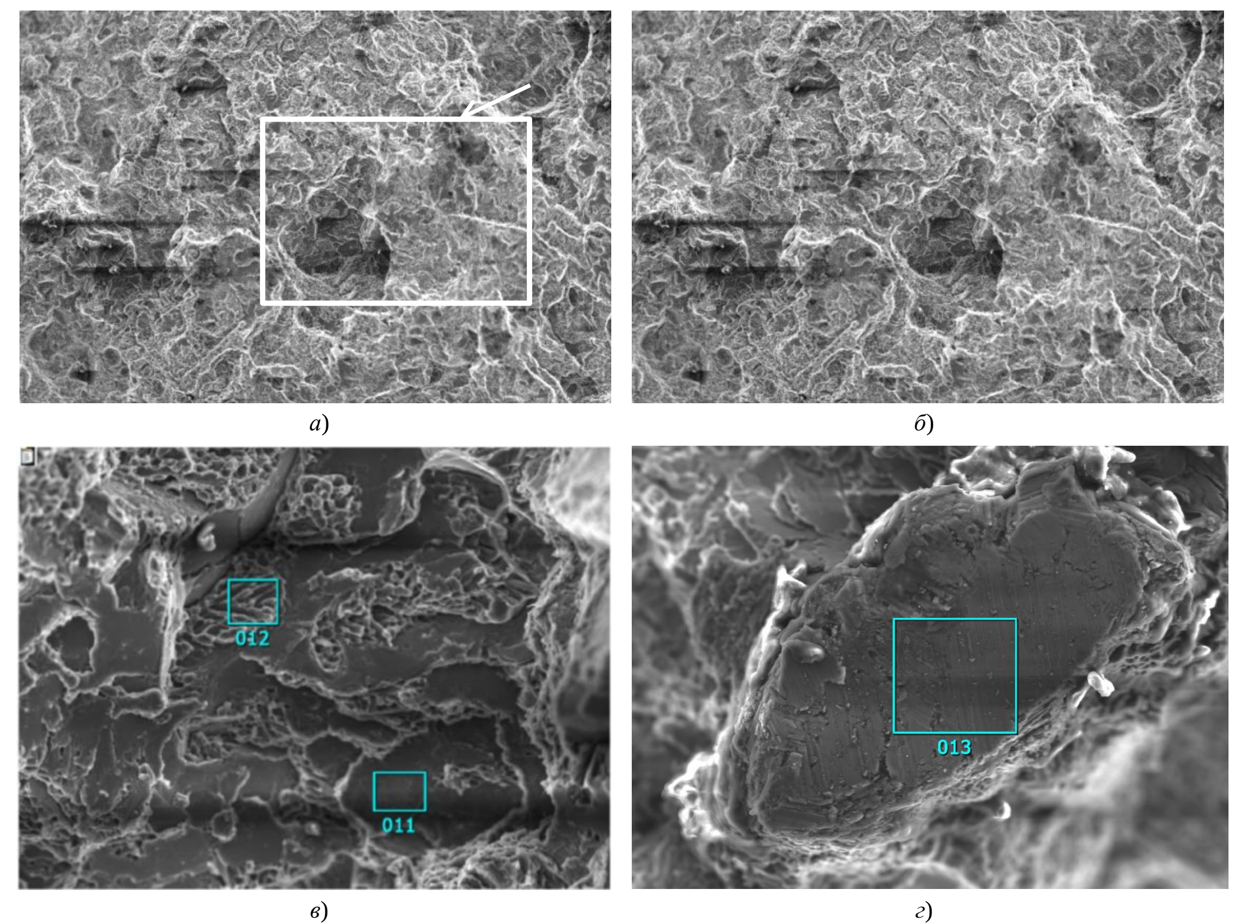


Рис. 2. Поверхность излома разрывного образца: *а* — общий вид с увеличением ×50; *б* — участки с гладким рельефом с увеличением ×150; *в* — смешанный рельеф с увеличением ×200; *г* — крупный сглаженный участок излома с увеличением ×200

При увеличении до ×500 видно, что блестящие участки представляют собой углубления, чаще со сглаженной поверхностью. Присутствуют незначительные участки с вязким рельефом, что характерно для хрупкого разрушения по механизму скола. Основная часть поверхности излома имеет вязкий рельеф. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности излома в точках 11, 12, 13 (рис. 2) представлены в таблице 4. Точки 11 и 13 соответствуют сглаженным участкам, точка 12 — вязкому.

Таблица 4

Химический анализ поверхности зон излома

№ точки (см. рис. 2)	Содержание элементов, масс. %			
	Mg	Al	Si	Fe
11	4,71	82,61	11,27	1,41
12	4,51	83,35	9,46	2,68
13	5,13	84,72	8,11	2,04

Спектрограммы точек идентичны (рис. 3). Не выявлены существенные отличия по химическому составу между зонами с вязким и хрупким сглаженным рельефом, что говорит об отсутствии включений и ликваций.

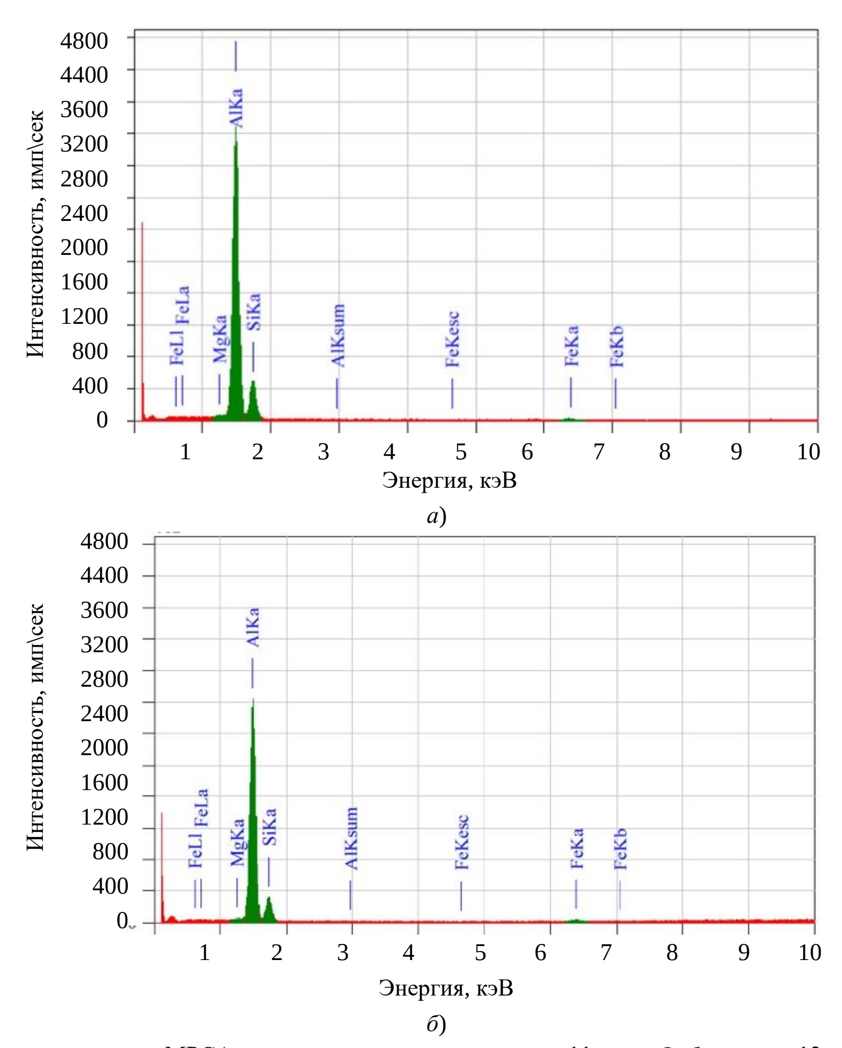
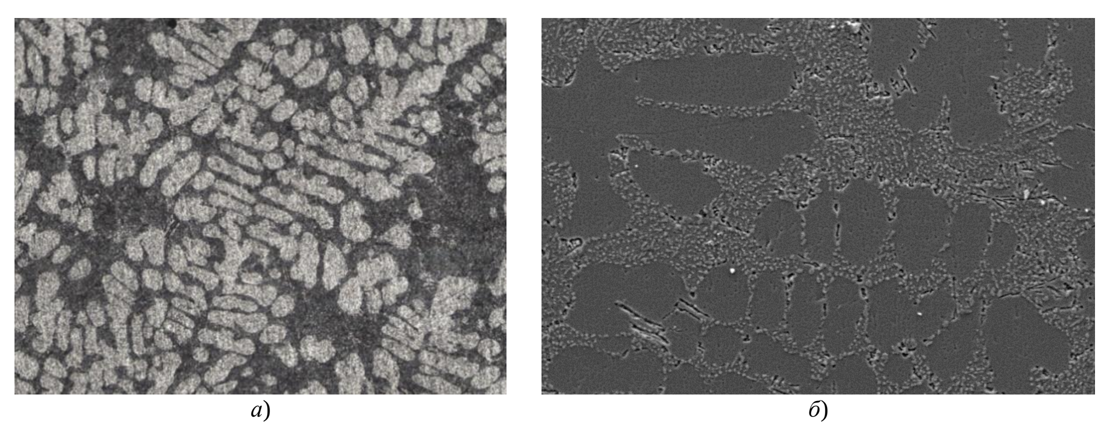


Рис. 3. Спектрограмма результатов МРСА поверхности излома: *а* — точка 11 с рис. 2; *б* — точка 12 с рис. 2. Здесь показаны интенсивность пика элемента в оже-спектре и энергия электронов, возникших в результате оже-эффекта

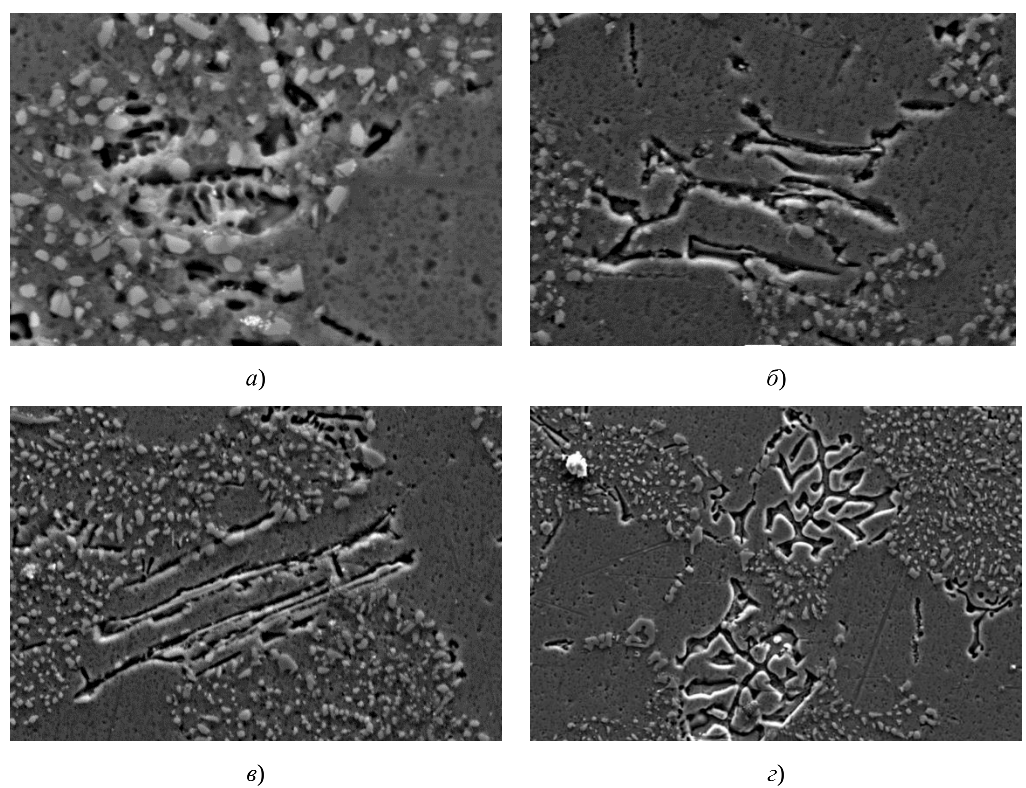
Микроструктура, исследованная на шлифах из разрывных образцов (плавки 5–8), соответствует модифицированному и термообработанному состоянию сплава АК9ч без признаков пережога (рис. 4 *а*). Наблюдаются отдельные темные игольчатые фазы и единичные поры. Под электронным микроскопом хорошо видны основные фазовые составляющие микроструктуры (рис. 4 *б*).



а) *б*)

Рис. 4. Внешний вид микроструктуры: *а* — световая оптическая микроскопия с увеличением ×200; *б* — электронная микроскопия с увеличением ×250

Данные электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа позволяют определить основные фазы: α (светлые зоны), α+Si (темные зоны). В фазе α+Si наблюдаются дисперсные выделения Si размером менее 5 мкм (рис. 5 *а*). Микрорентгеноспектральный анализ показал, что $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$ (рис. 5 *б*, *в*) частично выкрошились в процессе шлифования и полировки (рис. 5 *в*). Также наблюдается выделение фазы $Al_{36}Si_3Fe_6Mn_3$ в скелетообразной форме (рис. 5 *г*).

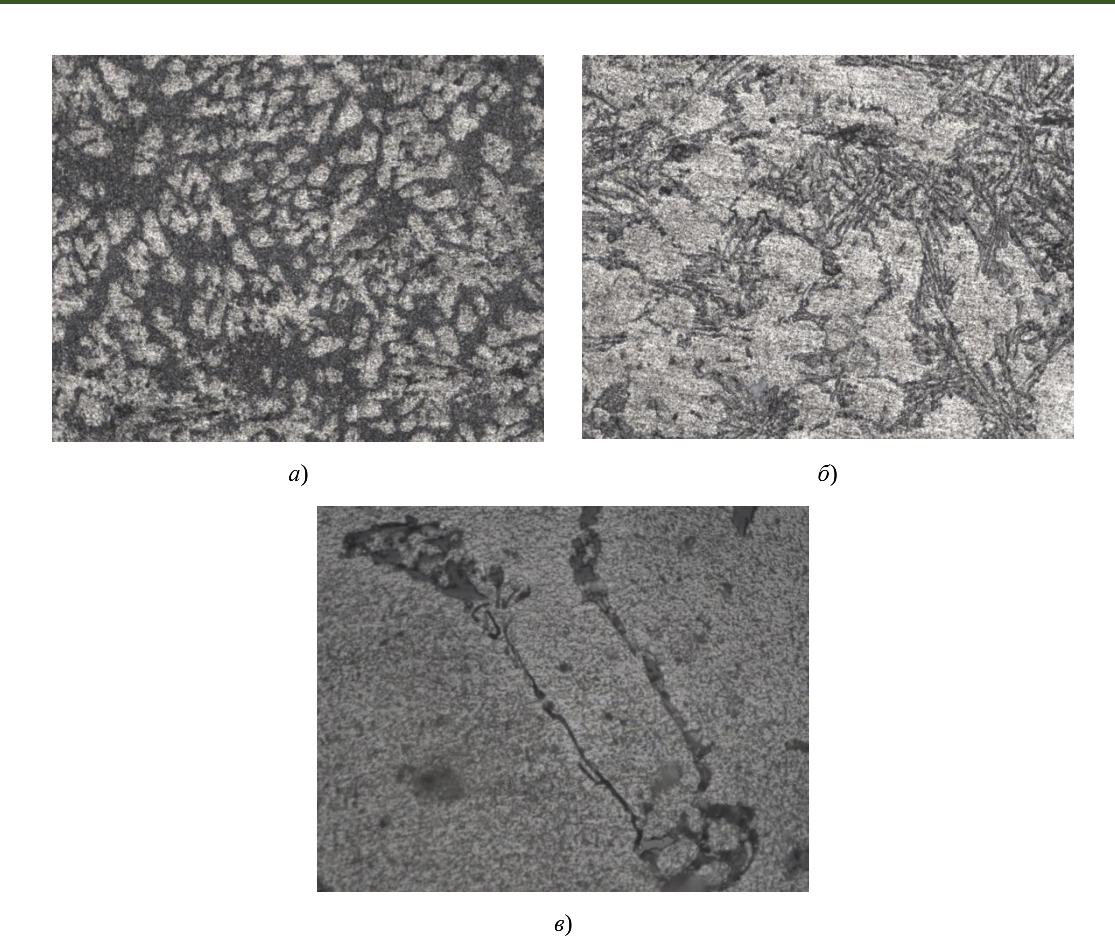


а) *б*)

в) *г*)

Рис. 5. Микроструктура образцов плавки (5–8): *а* — выделения кремния с увеличением ×2000; *б* — фазы $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$ с увеличением ×1000; *в* — выкрашивание хрупких пластин фаз $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$ с увеличением ×750; *г* — фаза $Al_{36}Si_3Fe_6Mn_3$ в скелетообразной форме с увеличением ×500

Микроструктура образцов чушек от производителя № 1 соответствует модифицированному состоянию сплава АК9ч. Ветви дендритов значительно меньше, чем в образце чушки от поставщика № 2. Размеры включений кремния — до 4 мкм. Они однородны и имеют глобулярный вид. Основные фазы α и α+Si (рис. 6 *а*). В структуре образцов чушек от производителя № 1 не обнаружены иглообразные фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$.



а) *б*)

в)

Рис. 6. Микроструктура исходной чушки: *а* — производителя № 1, 70 мкм с увеличением ×500;
б — производителя № 2, 70 мкм с увеличением ×500;
в — пластинчатая фаза в микроструктуре чушки производителя № 2, 20 мкм с увеличением ×1000

Микроструктура образца чушки от поставщика № 2 соответствует немодифицированному состоянию сплава АК9ч. Ветви дендритов крупные. Включения кремния иглообразные и крупные. Основные фазы — α и α+Si (рис. 6 *б*). Наблюдаются фазы в виде темных иглообразных включений (рис. 6 *в*).

Анализ результатов исследования позволяет предположить, что структурно-фазовый состав сплава обусловливает присутствие блестящих участков в изломе образцов от плавок 5–8. Это зоны со сглаженным рельефом — результаты хрупкого разрушения. Наиболее вероятная причина данного явления — наличие зон с грубыми иглообразными выделениями, которые представляют собой хрупкие пластины $Al_xSi_yFe_zMn_q$ с выраженной границей раздела. При растяжении или других разрушающих испытаниях эти выделения выступают в виде концентраторов (разрывов в металле). Соответственно, когда через них идет фронт развития трещины, происходит их выкрашивание. Поясним. Пластинчатые выделения — твердые и слабо удерживаются в основном металле. В процессе шлифовки и полировки образцов они выкрашивались, оставляя полости с гладкими стенками. На их месте остаются гладкие участки, которые блестят в изломе. Также можно предположить, что данные фазы устойчивы в расплаве (не растворяются в матрице). При охлаждении они будут выступать в виде центров кристаллизации и провоцировать образование дефектов, так как представляют собой острые концентраторы напряжений.

Кремний кристаллизовался в виде мелких частичек сферической формы, поэтому можно констатировать, что используемый модификатор эффективен для воздействия на кремний, входящий в состав эвтектики (α+Si). При этом для воздействия на игольчатые фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$ требуется корректировка технологического процесса. При введении 0,2–0,5 % Mn, как правило, удается подавить образование хрупких пластин фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$. Однако в исследуемых плавках (5–8), несмотря на содержание Mn 0,28–0,32 %, эта фаза сохраняется, так как она наследуется из исходного материала.

Обсуждение и заключение. По итогам проведенных научных изысканий можно сделать три основных вывода.

1. Структурно-фазовое состояние исходного материала наследуется в отливках и при наличии железосодержащих фаз в виде хрупких пластин может отрицательно влиять на качественные характеристики литых заготовок.

2. Светлые участки в изломах отливок представляют собой зоны со сглаженным рельефом. Они образовались в результате хрупкого разрушения, что связано с наличием переменного состава $Al_xSi_yFe_zMn_q$ в структуре хрупких пластин фазы.

3. Присутствие в химическом составе сплава Mn не всегда подавляет образование хрупких пластин железосодержащей фазы. Если она наследуется из исходного материала, данный традиционный подход не работает и не образуются компактные равноосные полиэдры с более слабым негативным влиянием. Для повышения качества отливок рекомендуется использовать в шихте чушки с предварительно модифицированной структурой, в которой отсутствуют включения пластин фазы переменного состава $Al_xSi_yFe_zMn_q$.

Список литературы

1. Полмеар Я. *Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов*. Москва: Техносфера; 2008. 464 с. URL: https://www.technosphera.ru/lib/book/72?read=1 (дата обращения: 26.06.2023).

2. Золоторевский В.С., Белов Н.А. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов*. Москва: МИСиС; 2005. 376 с. URL: https://e.lanbook.com/book/2055 (дата обращения: 26.06.2023).

3. Wei Yan, Weiqing Chen, Senlin Zhang, Bing Li, Jing Li. Evolution of solidification structures and mechanical properties of high-Si Al alloys under permanent magnetic stirring. *Materials Characterization*. 2019;157:109894. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109894

4. Makhlouf M.M., Guthy H.V. The aluminum–silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals*. 2001;1(4): 199–218. https://doi.org/10.1016/S1471-5317(02)00003-2

5. Haizhi Ye. An overview of the development of Al-Si alloy based material for engine applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2003;12:288–297. https://doi.org/10.1361/105994903770343132

6. Афанасьев В.К., Попова М.В., Прудников А.Н. Воздействие водорода на структуру и свойства заэвтектического силумина с 15% кремния. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022;(6):10–16. https://doi.org/10.30906/mitom.2022.6.10-16

7. Sathyapal Hegde, K. Narayan Prabhu. Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys. *Journal of Materials Science*. 2008;43:3009–3027 https://doi.org/10.1007/s10853-008-2505-5

8. Кузнецов А.О., Шадаев Д.А., Конкевич В.Ю. Модифицирование силуминов — разные подходы для одной системы легирования. *Технология легких сплавов.* 2014;(4):75–81.

9. Напалков В.И., Махов С.В., Поздняков А.В. *Модифицирование алюминиевых сплавов.* Москва: МИСиС; 2017. 347 с. URL: https://e.lanbook.com/book/117172 (дата обращения: 26.06.2023).

10. Jing Zhang, Hongmei Chen, Hui Yu, Yunxue Jin. Study on dual modification of Al-17%Si alloys by structural heredity. *Metals*. 2015;5(2):1112–1126 https://doi.org/10.3390/met5021112

11. FQ Zu, Li Xiaoyun. Functions and mechanism of modification elements in eutectic solidification of Al-Si alloys. *China Foundry*. 2014;11(4):287–309 URL: https://www.researchgate.net/publication/274634943_Special_Report_CHINA_FOUNDRY_Functions_and_mechanism_of_modification_elements_in_eutectic_solidification_of_Al-Si_alloys_A_brief_review (дата обращения: 26.06.2023).

References

1. Polmear Ya. *Legkie splavy: ot traditsionnykh do nanokristallov*. Moscow: Tekhnosfera; 2008. 464 p. URL: https://www.technosphera.ru/lib/book/72?read=1 (accessed: 26.06.2023).

2. Zolotorevskii VS, Belov NA. Metallovedenie liteinykh alyuminievykh splavov. Moscow: MISiS; 2005. 376 p. URL: https://e.lanbook.com/book/2055 (accessed: 26.06.2023).

3. Wei Yan, Weiqing Chen, Senlin Zhang, Bing Li, Jing Li. Evolution of solidification structures and mechanical properties of high-Si Al alloys under permanent magnetic stirring. *Materials Characterization*. 2019;157:109894. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109894

4. Makhlouf MM, Guthy HV. The aluminum–silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals*. 2001;1(4): 199–218. https://doi.org/10.1016/S1471-5317(02)00003-2

5. Haizhi Ye. An overview of the development of Al-Si alloy based material for engine applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2003;12:288–297. https://doi.org/10.1361/105994903770343132

6. Afanasev VK, Popova MV, Prudnikov AN. Effect of hydrogen on the structure and properties of eutectic silumin with 15% silicon. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2022;(6):10–16. https://doi.org/10.30906/mitom.2022.6.10-16

7. Sathyapal Hegde, K. Narayan Prabhu. Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys. *Journal of Materials Science*. 2008;43:3009–3027 https://doi.org/10.1007/s10853-008-2505-5

8. Kuznetsov AO, Shadayev DA, Konkevich VYu, Bochvar SG, Kunyavskaya TM. Modification of silumins: different approaches for one alloying system. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2014;(4):75–81.

9. Napalkov VI, Makhov SV, Pozdnyakov AV. Modifitsirovanie alyuminievykh splavov. Moscow: MISiS; 2017. 347 p. URL: https://e.lanbook.com/book/117172 (accessed: 26.06.2023).

10. Jing Zhang, Hongmei Chen, Hui Yu, Yunxue Jin. Study on dual modification of Al-17%Si alloys by structural heredity. *Metals*. 2015;5(2):1112–1126 https://doi.org/10.3390/met5021112

11. FQ Zu, Li Xiaoyun. Functions and mechanism of modification elements in eutectic solidification of Al-Si alloys. *China Foundry*. 2014;11(4):287–309 URL: https://www.researchgate.net/publication/274634943_Special_Report_CHINA_FOUNDRY_Functions_and_mechanism_of_modification_elements_in_eutectic_solidification_of_Al-Si_alloys_A_brief_review (accessed: 26.06.2023).

Об авторах:

Владимир Сергеевич Муратов, доктор технических наук, профессор кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов Самарского государственного технического университета (443100, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, muratov1956@mail.ru

Михаил Сергеевич Казаков, аспирант кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов Самарского государственного технического университета (443100, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), ResearcherID, ORCID, kazakov.mishel@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

В.С. Муратов — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

М.С. Казаков — формулирование основной концепции, целей и задач исследования, проведение испытаний, анализ, контроль, подготовка текста, формулирование выводов.

Поступила в редакцию 01.07.2023
Поступила после рецензирования 26.07.2023
Принята к публикации 03.08.2023

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 01.07.2023
Revised 26.07.2023
Accepted 03.08.2023

About the Authors:

Vladimir S. Muratov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, RF), ResearcherID, ScopusID, ORCID, muratov1956@mail.ru

Mikhail S. Kazakov, Postgraduate Student of the Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, RF), ResearcherID, ORCID, kazakov.mishel@gmail.com

Claimed contributorship:

VS Muratov: academic advising; research results analysis; revision of the text; conclusions correction.

MS Kazakov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study; testing; analysis; control; text preparation; conclusions formulation.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.